

Leibniz-Institut für Agrartechnik
Potsdam-Bornim e.V.



Hochschule Osnabrück
University of Applied Sciences



20. und 21. Workshop Computer- Bildanalyse in der Landwirtschaft 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft

26. Mai 2014, Osnabrück
07. Mai 2015, Braunschweig



Labor für
Biosystemtechnik

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 88

Potsdam-Bornim / Osnabrück 2014 / Braunschweig 2015

20. und 21. Workshop Computer- Bildanalyse in der Landwirtschaft

3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft

26. Mai 2014, Osnabrück
07. Mai 2015, Braunschweig

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 88

Potsdam-Bornim / Osnabrück 2014 / Braunschweig 2015

Herausgeber:

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

Mai 2015

Redaktion:

Manuela Zude-Sasse
Martin Kraft

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg (MWFK).

Für den Inhalt der Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

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

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., 2015

Inhalt	Seite
Grußwort	7
Aussteller:	
• CiS GmbH, Rostock	9
• Copting, Braunschweig	10
• HEXAPILOTS, Dresden	11
• insensiv GmbH, Bielefeld	12
• LemnaTec GmbH, Aachen	13
• Ocean Optics	14
Regionale fernerkundliche Erfassung des aktuellen landwirtschaftlichen Ertragspotenzials am Beispiel eines Testgebietes in Mecklenburg-Vorpommern	15
<i>Heike Gerighausen, Holger Lilienthal</i>	
Micro-UAV und neue leichtgewichtige Multispektralsensoren für agronomische Anwendungen	25
<i>Sonja Läderach, Natalie Lack, Stephan Nebiker</i>	
Automatische Erkennung von Pflanzenkrankheiten mit dem Smartphone	40
<i>Benjamin Klatt, Thomas Klein, Benno Kleinhenz, Erich-Christian Oerke, Lisa Hallau, Anne-Katrin Mahlein, Ulrike Steiner, Christian Bauckhage, Marion Neumann, Kristian Kersting, Manfred Röhrig</i>	
Konfigurationsmöglichkeiten und Datenkonzepte des Multiwavelength Line Profiling (MWLP) Systems	42
<i>Wolfram Strothmann, Vadim Tsukor, Joachim Hertzberg, Arno Ruckelshausen</i>	
Automatisierte Höhenbestimmung von Topfpflanzen mit dem OEOS-Lichtschattensensor am Beispiel von Weinreben	53
<i>Dominik Nieberg, Kevin Bilges, Fritz Matthäus, Daniel Mentrup, Arno Ruckelshausen</i>	
Automatisierte Wilderkennung im Grünland durch Fusion verschiedener Kamerasysteme und multispektraler Objekterfassung	67
<i>André Berghaus, Bernd Schniederbruns, Thomas Luhmann, Johannes Piechel, David Schwäke</i>	
Field imaging platform (FIP) – an automated system for plant phenotyping in the field	74
<i>Norbert Kirchgessner, Frank Liebisch, Andreas Hund, Achim Walter</i>	

Multi-Sensor platforms for detailed characterization of plant canopies during the entire growing season	82
<i>Stefan Paulus, Tino Dornbusch, Kevin Nagel</i>	
Robust and structure-preserving image denoising via median filtering and image segmentation	92
<i>Andreas Kleefeld, Maik Veste</i>	
Unterscheidung von Pflanzenarten anhand ihres Spektralprofils mittels einer Spektralen Datenbank am Beispiel von Beifußblättriger Ambrosie (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)	101
<i>Joachim Intreß, Martin Geyer, Karl-Heinz Dammer</i>	
Vergleichende Ertragsvorhersage von Winterweizen- und Wintergerstentensorten bei Trockenstress durch Messung der Bestandstemperatur	113
<i>Martin Kraft, Heiko Neeland, Angela Riedel</i>	
Smart-Kamera-basierte Online-Bildanalyse von Infrarot- und Stereobildern an Multikoptern	124
<i>Matthias Oelze, Falk Schmidsberger, Frieder Stolzenburg</i>	
Detection of crop properties by means of hyperspectral remote sensing from a micro UAV	129
<i>Dragos Constantin, Martin Rehak, Yosef Akhtman, Frank Liebisch</i>	
Computer-controlled automatic image acquisition and processing of fine roots with an minirhizotron system	138
<i>Maik Veste, Gerhard Kast, Hans-Peter Schäfer, Rüdiger Harms</i>	
Entwicklung eines kabelgebundenen und autonomen UAV zum Einsatz als Trägerplattform in der Landwirtschaft	142
<i>Christian Gieselmann</i>	
Voraussetzungen für eine automatisierte Unkrauterkenntung aus der Luft	145
<i>Michael Pflanz, Henning Nordmeyer</i>	
ISense PCF: The use of RPAS for the development of a methodology to assess the crop status in space and time quantitatively	147
<i>Koen C. Mertens, Peter Lootens, Tom De Swaef, Filip De Brouwer, Kurt Heungens, Jonas Aper, Alex De Vliegheer, Joost Baert, David Nuyttens, Isabel Roldán-Ruiz, Jürgen Vangeyte</i>	

Inhalt	Seite
Optische Sensorik an Multikoptern <i>Matthias Marks, Falk Schmidberger, Frieder Stolzenburg</i>	151
Automatische Auswertung von Überhohlvorgängen aus Luftbildaufnahmen mit dem UAS HORUS <i>Tom Hößler, Lucas Günther, Frank Steinert</i>	159
Hochaufgelöste RGBI-Bilddaten mit UAV <i>Ralf Gehrke, Ansgar Greiwe</i>	172
Vision-based estimation of cloudiness from weather maps for agricultural modelling <i>Erick Ronoh, Thomas Rath</i>	178
Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzenhöhen, Ähren und Grannen <i>Ivana Kovacheva, Simon Kerksen, Daniel Mentrup, Tina Rosemann, Kevin Bilges, Arno Ruckelshausen</i>	179
Erkennung von Beikraut in Sonderkulturen durch Klassifikation von Multisensorinformation <i>Johannes Meyer, Christian Frese, Christian Frey</i>	191
Verbesserte Identifikation landwirtschaftlicher Kulturen in Nordisrael durch Einbeziehung der Phänologie aus RapidEye-Daten <i>Florian Beyer, Thomas Jarmer, Bastian Siegmann, Sascha Klonus, Yael Etzion, David Broday</i>	200
Comparison of manual and automatic barcode detection in horticultural production systems <i>Felix Eyahanyo, Thomas Rath</i>	217
Vorstudie zur Erfassung des Sehvermögens bei Geflügel <i>Erik Wunder, Robby Andersson, Daniel Kämmerling, Arno Ruckelshausen</i>	218
Optimierung der Bildauswertung von Farbbildern aus Minirhizotronen zur Wurzelbeobachtung <i>Rüdiger Harms, Hans-Peter Schäfer, Gerhard Kast, Maik Veste</i>	228
Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur automatischen Detektion von Wurzeln in schwarz-weiß Minirhizotron-Bildern <i>Daniel Sachse, Martin Weigert, Maik Veste</i>	233
In der Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte sind bisher erschienen:	242

Grußwort

Automatische Phänotypisierung und unbemannte fliegende Systeme sind aktuelle Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung für die Automatisierung der Landtechnik. Diese Techniken haben bereits den Stand der kommerziellen Nutzung erreicht. Gleichwohl besteht eine breite Überzeugung, dass das große Potenzial dieser Techniken erst mit ausgereifteren Verfahren der automatischen Bildanalyse, der Sensorfusion und der künstlichen Intelligenz voll erschlossen werden kann.

In der gemeinsamen Veranstaltung des *21. Workshops Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft* und des *3. Workshops Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft* stellen Forscher aus der akademischen und industriellen Forschung neue Ansätze und Ergebnisse vor und stellen sich der wissenschaftlichen Diskussion. Die Dynamik der technisch-methodischen Entwicklung stellt die kommerziellen Anbieter unter einigen Druck. Sie müssen, um wettbewerbsfähig zu bleiben, neue und verbesserte Verfahren so früh wie möglich am Markt verfügbar machen und neue Anwendungsbereiche erschließen. Die Anwesenheit vieler kommerzieller Anbieter, teils noch junger Firmen, unterstreicht die wichtige Bedeutung dieser Workshop-Veranstaltung für einen schnellen Transfer wissenschaftlichen Fortschritts in leistungsfähigere Systeme und Dienstleistungen für Kunden aus der Landwirtschaft, der Pflanzenzüchtung und aus Behörden, um nur drei wichtige Zielgruppen zu nennen.

Dieses Heft der Bornimer Agrartechnischen Berichte enthält die schriftlichen Beiträge zu den Vorträgen und Postern der beiden Workshop-Veranstaltungen

- 20. Workshop Computer-Bildanalyse und Sensorik in der Landwirtschaft am 26. Mai 2014 in der Hochschule Osnabrück unter der Leitung von Thomas Rath
- 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft am 7. Mai 2015 im Thünen-Institut in Braunschweig unter der Leitung von Martin Kraft und Heiko Neeland.

Während es für aktuelle Schwerpunktthemen wie die automatische Phänotypisierung und unbemannte fliegende Systeme ein größeres Angebot an wissenschaftlichen Vortragsveranstaltungen und Workshops gibt, ist und war der *Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft* immer auch eine Plattform für ganz spannende und mutige methodische Ansätze und Anwendungsideen zerstörungsfreier Sensorik außerhalb des wissenschaftlichen Mainstreams. Die jedes Jahr neue Vielfalt an Ideen und Ansätzen, an Erfolgen aber auch Misserfolgen machen jede Auflage dieses Workshops zu einem bereichernden Erlebnis. Dafür danken wir allen Vortragenden, Poster-Erstellern und Autoren der beiden Workshops in Osnabrück und Braunschweig.

Das vor 20 Jahren von Bernd Herold am damaligen Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB) begründete Workshop-Format „Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft“ hat auch 2015 nichts von seiner Aktualität eingebüßt, und hoffentlich auch nicht seinen speziellen Charme. Wir begrüßen alle Workshop-Teilnehmer in Braunschweig und

wünschen Ihnen einen interessanten und inspirierenden Tag mit lebendigen Vorträgen und Diskussionen, aufgelockert durch einige motivierende Flugvorführungen.

Wir bedanken uns bei allen fleißigen Händen und hilfreichen Geistern, die uns während der Vorbereitung und Durchführung der Workshops in Osnabrück und Braunschweig tatkräftig unterstützt haben. Wir danken Manuela Zude-Sasse im ATB für die wissenschaftliche und organisatorische Begleitung der Workshop-Reihe sowie allen Mitwirkenden im ATB für die trotz des Zeitdrucks wieder liebevolle Erstellung und Gestaltung dieses ansprechenden und gelungenen Tagungsbandes. Dieser wird den Teilnehmern zu Beginn des Workshops überreicht und danach dankenswerter Weise vom Bibliotheksverbund Berlin-Brandenburg (KOBV) dauerhaft im Internet bereit gestellt. Der Druck des Tagungsbandes wurde durch die ausstellenden Firmen und das ATB finanziell unterstützt, wofür wir uns ebenfalls bedanken.



Martin Kraft



Heiko Neeland



Thomas Rath

Braunschweig und Osnabrück im April 2015



Die CiS GmbH ist ein KMU mit ca. 20 Mitarbeitern.

Sie beschäftigt sich mit Raumbezogenen Informations- und Ressourcenmanagementsystemen, insbesondere für die Landwirtschaft. Mit erfahrenen praktischen Landwirten wurde seit mehr als 10 Jahren das Agrarmanagementsystem „ADAM“ erarbeitet. Es ist für die Begleitung der feldbaulichen Produktion ausgelegt und umfasst *Precision Farming*, und den Einsatz von UAV.

CiS entwickelt und vertreibt für Feldbaubetriebe und andere Software und Hardware wie das Agrarmanagement oder das UAS.



Flugeigenschaften:

Gewicht mit Akku:	2 kg
Nutzlast:	bis zu 700 g
Flugzeit (ohne Zuladung):	~ 45 min
Flugzeit (mit Zuladung 500g):	~ 30 min
Fluggeschwindigkeit:	bis zu 10 m/s (=36 km/h)
Flugreichweite (mit Zuladung 500g):	~ 9 km (Hin- und Rückflug)
Flughöhe (technisch):	bis zu 1 km
Windresistenz:	bis 10 m/s (Windstärke 5 bft)

.....

Weitere Informationen: www.cis-rostock.de www.cis-copter.de

Flieg mit mir!



PERSPEKTIVEN MIT SYSTEM

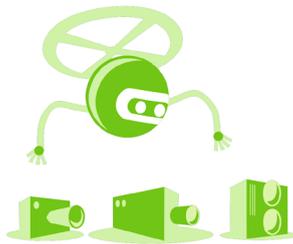
So arbeiten wir für Sie

1



Analyse, Beratung und
Projektmanagement
durch Spezialisten

2



Nutzen unserer
Piloten-, Experten- und
Technik-Pools

3



Copterbau, Forschung,
Neu- und
Weiterentwicklung

4



Umsetzung sowie
Daten erfassen, aus-
werten und optimieren

- Erschließen Sie sich branchenunabhängig:
Perspektiven, Einblicke und Übersichten aus der Luft
- Realisieren Sie neue Anwendungsmöglichkeiten
- Beschleunigen Sie Analysen und optimieren Sie Ihren Ressourceneinsatz
- Copting: Qualität, Professionalität und Sicherheit

Ansichten, Übersichten
und Einblicke



HEXAPILOTS®
UAS-FLUGDIENSTLEISTUNGEN



Maiszünsler-Bekämpfung mit Trichogramma-Kugeln

Photo courtesy of fishhawk



Vegetationsindex (NDVI) Orthofoto und Vermessung

www.hexapilots.de



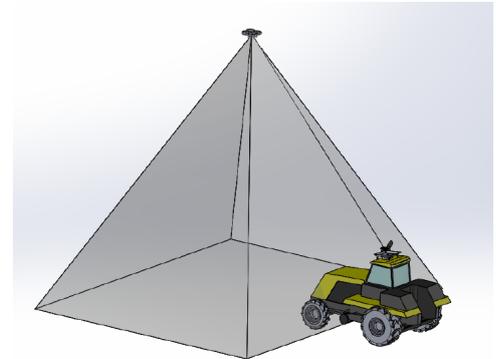
INSENSIV
BETTER_TO_KNOW

PodCopter

Flugobjekt als kabelgebundene Trägerplattform



Copter mit
Spannungsversorgung
und Sicherungsleine



Einfach

1. Automatische Positionierung (relativ zum Fahrzeug)
 - Direkt voraus in Fahrtrichtung
 - Parallel zur Bestandskante
 - Seitlich zur Steuerung der Überlade-Funktion
2. Steuerung on Board
 - Positionierung mittels Kamera und Markierung am Fahrzeug
3. Automatischer Start und Landung

Flexibel

1. Ausstattung mit beliebiger Sensorik/ auch eigene Sensorik
 - Thermografie
 - 3D
 - Spektralmessung
 - Bildverarbeitungssystem

Sicher

1. Unbegrenzte Flugzeit
2. Verletzt keine Luffahrtbestimmungen
3. Sichere Handhabung

Insensiv GmbH

Heidsieker Heide 114

D—33739 Bielefeld

Tel.: +49(0)52 06 - 9 69 54 – 0

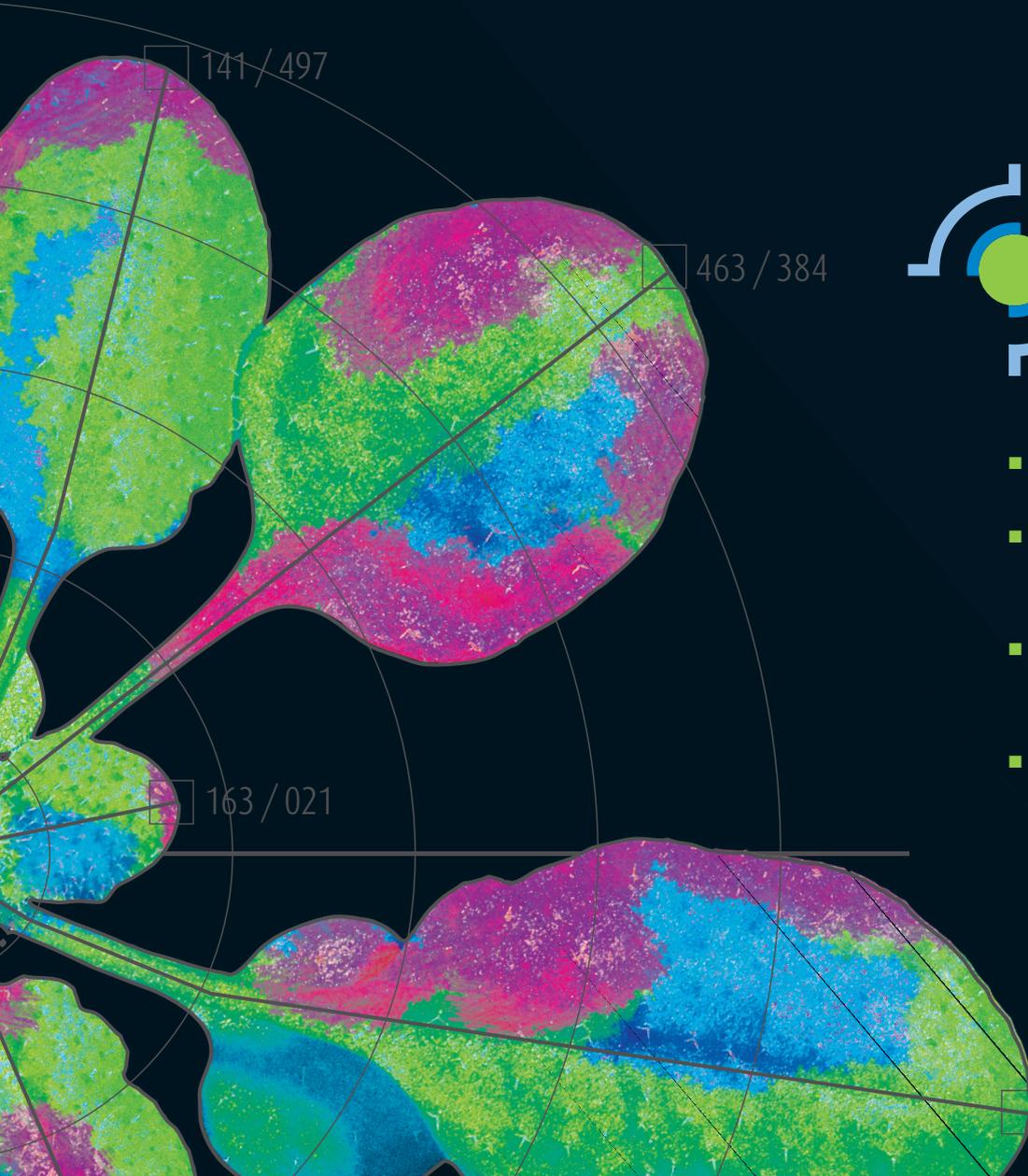
Fax: +49(0)52 06 - 9 69 54 - 55

info@insensiv.de

www.insensiv.de

Get phenotyping up to speed

Plant phenotyping is a rapidly evolving concept aiming at elucidating the functional role of gene networks under natural conditions. How do the interactions between the genome and the environment evolve, with respect to both quality and quantity? Introducing the new high throughput and high content plant phenotyping platform LemnaTec provides the technology to meet the challenge.



- fully automated 3D plant phenotyping
- visual light, chlorophyll fluorescence, near infra red and infra red imaging
- standardized growth conditions with the LemnaTec moving field concept
- automated weighing, watering and spraying of up to 4000 plants per day

THE FUTURE HAS ARRIVED.

Flame Blazes a New Trail in Miniature Spectroscopy.



Flame. Forging a New Standard in Miniature Spectrometers.

With the release of the "World's First Miniature Spectrometer," Ocean Optics helped to make spectroscopy portable, inexpensive and accessible. Now, inspired by your feedback, we've reinvented our miniature spectrometer to reflect the challenges of today's most demanding applications. Flame delivers greater thermal stability and lesser unit-to-unit variability, plus the freedom of interchangeable slits, simple device connectors and LED status indicators.



www.oceanoptics.com | info@oceanoptics.com | EUROPE +31 26-3190500 US +1 727-733-2447 ASIA +86 21-6295-6600

Regionale fernerkundliche Erfassung des aktuellen landwirtschaftlichen Ertragspotenzials am Beispiel eines Testgebietes in Mecklenburg-Vorpommern

Regional detection of the current agricultural yield potential by remote sensing - a case study in Mecklenburg-Vorpommern

Heike Gerighausen, Holger Lilienthal

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

Email: heike.gerighausen@jki.bund.de, holger.lilienthal@jki.bund.de

Zusammenfassung: Die amtliche Agrarstatistik stellt Informationen zu landwirtschaftlichen Erträgen nur auf Kreis- bzw. Landesebene und mit einer erheblichen zeitlichen Verzögerung bereit. Fernerkundungsverfahren können indes den Vegetationszustand großräumig in der Fläche und über die Zeit erfassen. In Vorbereitung auf die europäische Mission Sentinel-2 widmet sich die Pilotstudie RiflE der regionalen Bestimmung des aktuellen landwirtschaftlichen Ertragspotenzials von Ackerkulturen unter Verwendung von Fernerkundungsdaten und eines Ansatzes aus der Wachstumsmodellierung. Basierend auf mehr als 150 Spektrometernmessungen im Gelände wurden statistische Modelle (PLSR) zur Schätzung des Blattflächenindex (LAI) und der trockenen Biomasse (TM) von Winterweizenbeständen generiert. Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen das hohe Potenzial der zukünftigen Sentinel-2 Daten ($R^2_{LAI, val}=0.83$, $R^2_{TM, val}=0.82$) zur Vorhersage der biophysikalischen Parameter. Für die spektrale Konfiguration des Landsat 8 OLI Sensors konnten LAI und TM mit einem Bestimmtheitsmaß (R^2_{val}) von 0.76 bzw. 0.66 geschätzt werden. Erste flächenscharfe Ertragsschätzungen basierend auf Landsat 8 OLI Daten weisen im Mittel weniger als 7% Abweichung im mittleren Ertrag pro Schlag im Vergleich zur Waage auf. Die schlaginterne räumliche Verteilung der fernerkundungsbasierten Schätzungen weist zudem Übereinstimmungen mit den GPS-gestützten Ertragskarten auf. Ein absoluter Vergleich gestaltet sich aufgrund zahlreicher Fehlerquellen bei der Ertragskartierung jedoch problematisch.

Deskriptoren: Ertrag, Winterweizen, Partial Least Squares Regression, Spektrometrie, Landsat 8 OLI, Sentinel-2

Abstract: *Official agricultural statistics provide information on agricultural yield at annual intervals but only on NUTS¹ 3 level (districts) and NUTS 1 (states) level respectively*

¹ Nomenclature of Territorial Units for Statistics

and with a considerable time delay. Because remote sensing offers spatially and spectrally differentiated information over large areas it may contribute essential supplementary information to conventional agricultural statistics. In preparation for the European earth observation mission Sentinel-2 a pilot study (RifE) was initiated to evaluate the potential of remote sensing and a growth modeling approach for the regional assessment of agricultural yield. Based on more than 150 reflectance measurements in the field partial least squares regression models (PLSR) were set up to estimate leaf area index (LAI) and dry matter (DM) of winter wheat. Results indicate a high potential for parameter estimation from Sentinel-2 data with coefficients of determination (R^2_{val}) of 0.83 and 0.82 for LAI and DM respectively. The spectral configuration of Landsat 8 OLI resulted in R^2 of 0.76 for LAI and R^2 of 0.66 for DM prediction models. Yield estimations based on Landsat 8 image data revealed less than 7% deviation compared to balance reference per field. Similarities could be observed with regard to the within-field variability of GPS yield maps. However, a direct comparison is difficult due to a variety of inherent errors in raw yield data.

Keywords: Yield, winter wheat, partial least squares regression, spectrometry, Landsat 8 OLI, Sentinel-2

1 Einleitung

Ertragsschätzungen sind eine wichtige Informationsgrundlage für die Beurteilung der landwirtschaftlichen Marktsituation, die Erstellung von Versorgungsbilanzen und die Organisation und Beurteilung der Gemeinsamen Agrarpolitik. Sie sind zudem eine zusätzliche Informationsebene für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen. Im Agrarstatistikgesetz (AGRSTATG 2014) ist die Ernteerhebung für Feldfrüchte des Ackerlandes auf nationaler Ebene gesetzlich geregelt. Auf dieser Grundlage werden jährlich Angaben über die Erträge der Hauptfeldfrüchte bereitgestellt. Verfahrensbedingt stehen diese Ergebnisse jedoch einerseits nur auf Kreis- bzw. Landesebene zur Verfügung. Andererseits erfolgt die Veröffentlichung erst im Frühjahr des Folgejahres (Landesebene) bzw. im weiteren Verlauf dieses Jahres (Bundesebene).

Die Fernerkundung kann Informationen zur Art und zum Zustand landwirtschaftlicher Kulturen für große Gebiete in der Fläche und über die Zeit hinweg bereitstellen (z.B. FÖRSTER *et al.* 2012, ZHEN & MOSKAL 2009). Mit Ihrer Hilfe können herkömmliche Verfahren der Ertragserhebung möglicherweise ergänzt und verbessert werden. Es existieren drei grundlegende methodische Ansätze, um Ertragsschätzung aus Fernerkundungsdaten abzuleiten. Die direkte Korrelation von Indizes mit dem Ertrag ist die einfachste Methode, auf deren Unzulänglichkeiten jedoch in zahlreichen Studien hingewiesen wurde (z.B. UNO *et al.* 2005, ZARCO-TEJADA *et al.* 2005). Ein zweiter Ansatz geht davon aus, dass die Bildung trockener Biomasse als Funktion der durch die Vegetation absorbierten, photosynthetisch aktiven Strahlung und der Lichtnutzungseffizienz model-

liert werden kann (MONTEITH 1977). Der dritte und komplexeste Ansatz ist die Assimilation von Fernerkundungsdaten in Wachstumsmodelle (BACH & MAUSER 2003).

Im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus werden voraussichtlich ab Mitte 2016 optische Bilddaten der Sentinel-2 Mission in hoher räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung kostenfrei zur Verfügung stehen (ESA 2015). Im Vorfeld dieser Mission finden im Rahmen einer Pilotstudie (RiflE) Untersuchungen zur Ertragsschätzung von Ackerkulturen durch die Verknüpfung von Fernerkundungsdaten mit dem Ansatz der Lichtnutzungseffizienz statt. In diesem Beitrag werden Analysen zum Einfluss der spektralen Konfiguration von Sentinel-2 und Landsat 8 OLI Daten auf die Vorhersagegenauigkeit der statistischen Modelle für den Blattflächenindex und die Trockenmasse vorgestellt. Darüber hinaus werden erste Ergebnisse für Ertragsschätzungen von Winterweizen auf der Basis von Landsat 8 OLI Daten in einem Testgebiet in Mecklenburg-Vorpommern präsentiert.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Studie fokussiert auf landwirtschaftliche Flächen in der Gemeinde Dettmannsdorf im Landkreis Vorpommern-Rügen in Mecklenburg Vorpommern (s. **Abbildung 2**). In diesem Gebiet liegen für ausgewählte Flächen Referenzinformationen zur angebauten Kulturart und zu den real gewogenen Erträgen im Jahr 2013 vor. Teilweise sind GPS Ertragskartierungen vorhanden.

Die landwirtschaftlichen Flächen befinden sich im Flach- und Hügelland um Warnow und Recknitz. Die Böden sind auf geologische Vorgänge des Pleistozäns (Weichseleiszeit) und Holozäns zurückzuführen und weisen eine mittlere Ackerzahl von 34 auf (LUNG 2005). Das langjährige Niederschlagsmittel beträgt 627mm pro Jahr, das langjährige Mittel der Temperatur 8.5°C (DWD 1981-2010).

2.2 Felddaten

Zwischen 2011 und 2014 wurden in verschiedenen Geländekampagnen im Raum Köthen in Sachsen-Anhalt und auf den Versuchsflächen des Julius Kühn-Institutes in Braunschweig mehr als 150 Reflexionsspektren (350-2500 nm) von Winterweizenbeständen erhoben. Das Reflexionssignal der Vegetationsbestände wurde auf einem Areal von 0.25 m² mit Feldspektrometern, einem ASD Field Spec (ASD Inc.) sowie einem SVC (Spectra Vista Corporation), aufgezeichnet. Zusätzlich wurden für die Messareale der Blattflächenindex mit einem LAI-2200 (LI-COR Inc.) gemessen. Nach Abschluss der Messungen wurden die Plots beerntet und die trockene Biomasse durch Trocknung bei 60°C bestimmt.

2.3 Fernerkundungsdaten

Landsat Daten sind seit 2008 kostenfrei verfügbar (WOODCOCK *et al.* 2008, WULDER *et al.* 2012) und sind ebenso wie Sentinel-2 Daten multispektrale Daten mit Kanälen im VIS-NIR-SWIR-Bereich. Für die Studie wurden drei Datensätze (14.6, 9.7., 16.7.2013) des Operational Land Imagers (OLI) des Landsat 8 Satelliten verwendet. Der OLI besitzt 8 Spektralbänder (1-7,9), die vom sichtbaren Bereich des Lichtes bis ins kurzwellige Infrarot reichen. Die räumliche Auflösung beträgt 30mx30m (ROY *et al.* 2014). Die Bilddaten (Band 1-7) wurden mit Atcor3 (RICHTER 2000) unter Verwendung des DGM25 atmosphären- und terrainkorrigiert. Wolken wurden mithilfe des FMask Algorithmus (ZHU & WOODCOCK, 2012) detektiert und eliminiert. Basierend auf dem ATKIS Basis-DLM (ATKIS BASIS-DLM 2013) wurde in einem letzten Vorverarbeitungsschritt die ackerbaulich genutzte Fläche extrahiert.

2.4 Methoden

Die Ertragsschätzung der Ackerkulturen basiert auf der Verknüpfung von Verfahren der Fernerkundung mit einem vereinfachten Ansatz aus der Wachstumsmodellierung.

Mittels orthogonaler Partial Least Squares (PLS) für eine Y Variable (MARTENS & NÆS 1989) wurden Regressionsmodelle zur Schätzung des Blattflächenindex (LAI) und der Trockenmasse (TM) aus den Feldspektren erstellt. Die Modelle wurden mit der Software Unscrambler (CAMO Software AS) mit Originalspektren, vektornormierten Spektren (UVN) und z-transformierten Spektren (SNV) generiert und jeweils das beste Modell selektiert. Zur Bildung der Regressionsmodelle wurden die Daten in einen Kalibrations- und einen Validationsdatensatz getrennt. Jeder zweite Datensatz wurde zur Kalibration verwendet. Die übrigen Daten dienten der unabhängigen Validation des Modells. Die Schätzgenauigkeit wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes und der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE) beurteilt. Die Anpassung der Modelle an die spektrale Konfiguration der Satellitendaten erfolgte durch vorheriges spektrales Resampling.

Die Simulation des Pflanzenwachstums basiert auf einem Ansatz von MONTEITH (1977), wonach der tägliche Zuwachs an trockener Biomasse TM_i [$t\ ha^{-1}$] aus dem absorbierten Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung $fPAR$ [$MJ\ m^2$] am Tag i und der kulturartenspezifischen Lichtnutzungseffizienz ε [$g\ MJ^{-1}$] berechnet werden kann:

$$TM_i = \varepsilon \cdot fPAR_i$$

$fPAR$ lässt sich wiederum aus dem photosynthetisch aktiven Teil der Globalstrahlung GS [$MJ\ m^{-2}$], dem Blattflächenindex LAI [$m^2\ m^{-2}$] und dem Extinktionskoeffizient k [dimensionslos] entsprechend dem Lambert-Beerschen Gesetz berechnen (MONSI & SAEKI 2005, SZEICZ 1974):

$$fPAR = 0.5 \cdot GS \cdot (1.0 - e^{-k \cdot LAI})$$

Die Globalstrahlung wurde den Tagessummenwerten des Deutschen Wetterdienstes (bereitgestellt als 1kmx1km Raster) entnommen.

Eine Verringerung des täglichen Trockenmassezuwachses durch mittlere Tagestemperaturen kleiner 10°C bzw. größer 25°C wurde durch einen zusätzlichen Temperaturfaktor berücksichtigt (ZHENG *et al.* 2014). Weitere Stressfaktoren (z.B. Trockenheit, Nährstoffmangel) werden mit diesem Modellierungsansatz zurzeit nicht direkt erfasst. Der Ertrag lässt sich aus der erzielten trockenen Biomasse zum Erntetermin durch Multiplikation mit dem Harvest Index bestimmen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die in mehreren Feldkampagnen erfassten Vegetationsparameter von Winterweizen der 0.25 m² umfassenden Messflächen weisen LAI-Werte zwischen 0.13 und 5.84m² m⁻² mit einem mittleren Wert von 2.65 m² m⁻² auf. Die trockene Biomasse rangiert zwischen 0.36 und 18.02 t ha⁻¹. Der Mittelwert beträgt 7.58 bzw. 7.55 t ha⁻¹ (**Tabelle 1**). Beide Parameter weisen eine zweigipflige Verteilung auf, da witterungsbedingt bisher nur wenige Feldmessungen zwischen dem 4. Knotenstadium (BBCH 34) und dem Ährenschieben (BBCH 56) vorhanden sind.

Tabelle 1: Deskriptive Statistik der im Gelände erhobenen LAI- und TM-Werte. MW: Mittelwert, SD: Standardabweichung

Parameter	Typ	n	MW	Min	Max	SD
LAI [m ² m ⁻²]	cal	80	2.65	0.13	5.95	1.41
	val	79	2.65	0.33	5.84	1.39
TM [t ha ⁻¹]	cal	80	7.58	0.36	18.02	4.48
	val	79	7.55	0.40	16.85	4.38

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Genauigkeit der PLSR-Modelle basierend auf den Feldspektren (SVC/ASD). Im Vergleich dazu sind die Fehlergrößen für die Sentinel-2 (S2) und Landsat 8 OLI (L8 OLI) Modelle dargestellt. Die Kalibrationsmodelle auf Basis der Feldspektren weisen einen R² von 0.86 bzw. 0.88 und einen RMSE von 0.52 m² m⁻² und 1.53 t ha⁻¹ für LAI und TM auf. Die Validation bestätigt für beide Modelle, dass 86% der Variabilität der Zielvariablen LAI bzw. TM erklärt werden können. Der RMSE_{LAI} beträgt im Validationsdatensatz 0.52m² m⁻², allerdings nimmt die Streuung entlang der 1:1 Geraden für LAI größer 3 leicht zu. LAI größer 4.5 werden durch das Modell tendenziell unterschätzt (**Abbildung 1**, links). Der RMSE_{TM} beläuft sich auf 1.64 t ha⁻¹. Die Streuung ist im gesamten Wertebereich annähernd gleichmäßig (**Abbildung 1**, rechts).

Die Anpassung der Modelle auf die spektrale Konfiguration des Sentinel-2 sowie des Landsat 8 OLI resultierte erwartungsgemäß in einer Verschlechterung der Vorhersage-

genauigkeiten. Die Spezifikation von Sentinel-2 mit 13 Kanälen (ESA 2015) ist dennoch vielversprechend im Hinblick auf Parameterschätzungen aus diesen Bilddaten. Die Validation der S2-Modelle weist R^2_{LAI} von 0.83 und R^2_{TM} von 0.82 auf. Der RMSE steigt im Vergleich zu den PLSR-Modellen auf Basis der Feldspektren nur um 9.6% und 12.2% für LAI und TM. Der RMSE der PLSR-Modelle für Landsat 8 OLI wächst dagegen um 30.8% und 54.3% an (**Tabelle 2**). Zudem ist die Streuung im L8 OLI-Modell zur Schätzung der TM sehr hoch. Werte kleiner $6t\ ha^{-1}$ werden überschätzt, Werte über $11t\ ha^{-1}$ werden unterschätzt (nicht dargestellt).

Tabelle 2: Vorhersagegenauigkeit der PLSR-Modelle zur Schätzung des LAI und der TM von Winterweizen für unterschiedliche spektrale Sensorkonfigurationen. cal: Kalibration, val: Validation, VV: Spektrenvorverarbeitung, UVN: Vektornormierung, SNV: z-Transformation

Sensor	VV	LAI		LAI		VV	TM		TM	
		$R^2_{cal/val}$	$R^2_{cal/val}$	$RMSE_{cal/val}$	$RMSE_{cal/val}$		$R^2_{cal/val}$	$R^2_{cal/val}$	$RMSE_{cal/val}$	$RMSE_{cal/val}$
SVC/ASD	ohne	0.86	0.86	0.52	0.52	UVN	0.88	0.86	1.53	1.64
S2	UVN	0.85	0.83	0.55	0.57	SNV	0.86	0.82	1.64	1.84
L8 OLI	ohne	0.80	0.76	0.62	0.68	ohne	0.68	0.66	2.53	2.53

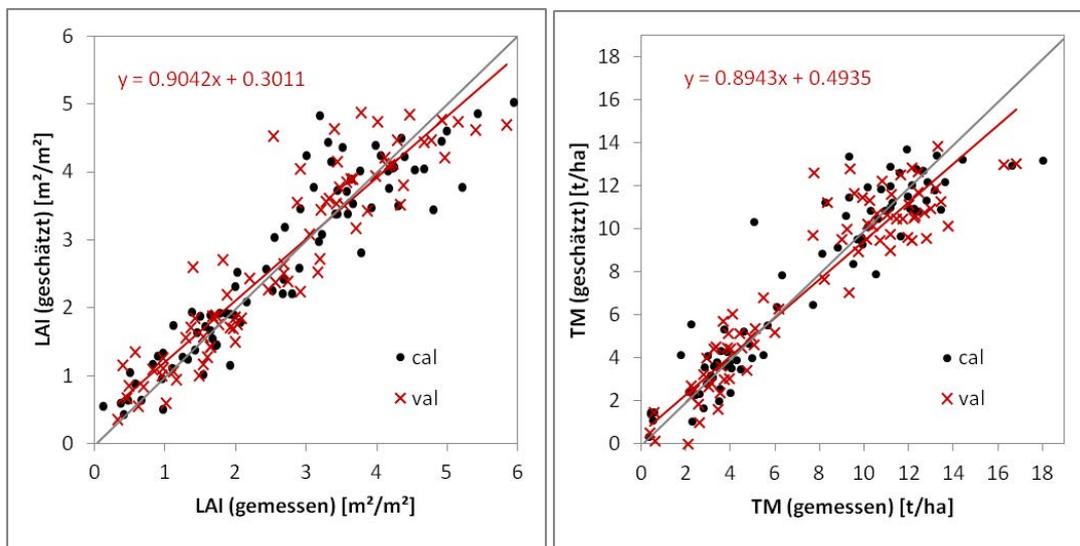


Abbildung 1: Scatterplot der PLSR-Modelle zur Schätzung des Blattflächenindex (LAI) und der Trockenmasse (TM) basierend auf ASD bzw. SVC Feldspektren.

Trotz der geringeren Vorhersagegenauigkeiten für LAI und TM der PLSR-Modelle für L8 OLI, konnten bei Ertragsschätzungen basierend auf den L8 OLI Bilddaten gute Ergebnisse erzielt werden. Als Referenz standen die gewogenen Erträge für zehn Winterweizenschläge in der Gemeinde Dettmannsdorf zur Verfügung. Die Abweichungen im mittleren Ertrag pro Schlag betragen zwischen 0.4% und 13.8% (Absolutwerte) im Vergleich zur Waage. Die mittlere Abweichung beläuft sich auf 6.4% (**Tabelle 3**).

Tabelle 3: Vergleich der fernerkundlich geschätzten mittleren Weizenerträge [t ha⁻¹] (FE) mit den gewogenen Erträgen pro Schlag (Waage) und den Ergebnissen der GPS-Ertragskartierung (GPS-EK)

ID	Mittlerer Ertrag [t ha ⁻¹]			Abweichung von der Waage [%]	
	FE	GPS-EK	Waage	FE	GPS-EK
2	8.16	10.35	9.11	-10.44	13.61
24	8.16	9.98	8.52	-4.2	17.14
37	7.91	9.71	8.40	-5.88	15.61
46	6.76	10.14	7.84	-13.83	29.27
54	7.26	8.70	7.24	0.38	20.27
55	7.82	9.26	7.69	1.67	20.51
61	5.57	7.85	5.84	-4.63	34.35
65	8.47	11.16	7.49	13.14	49.01
67	7.55	9.21	7.14	5.77	29.03
70	7.71	9.98	7.43	3.80	34.39
MW_{abs}	7.54	9.63	7.67	6.37	26.32
Min_{abs}	5.57	7.85	5.84	0.38	13.61
Max_{abs}	8.47	11.16	9.11	13.83	49.01
SD_{abs}	0.85	0.93	0.90	4.61	11.01

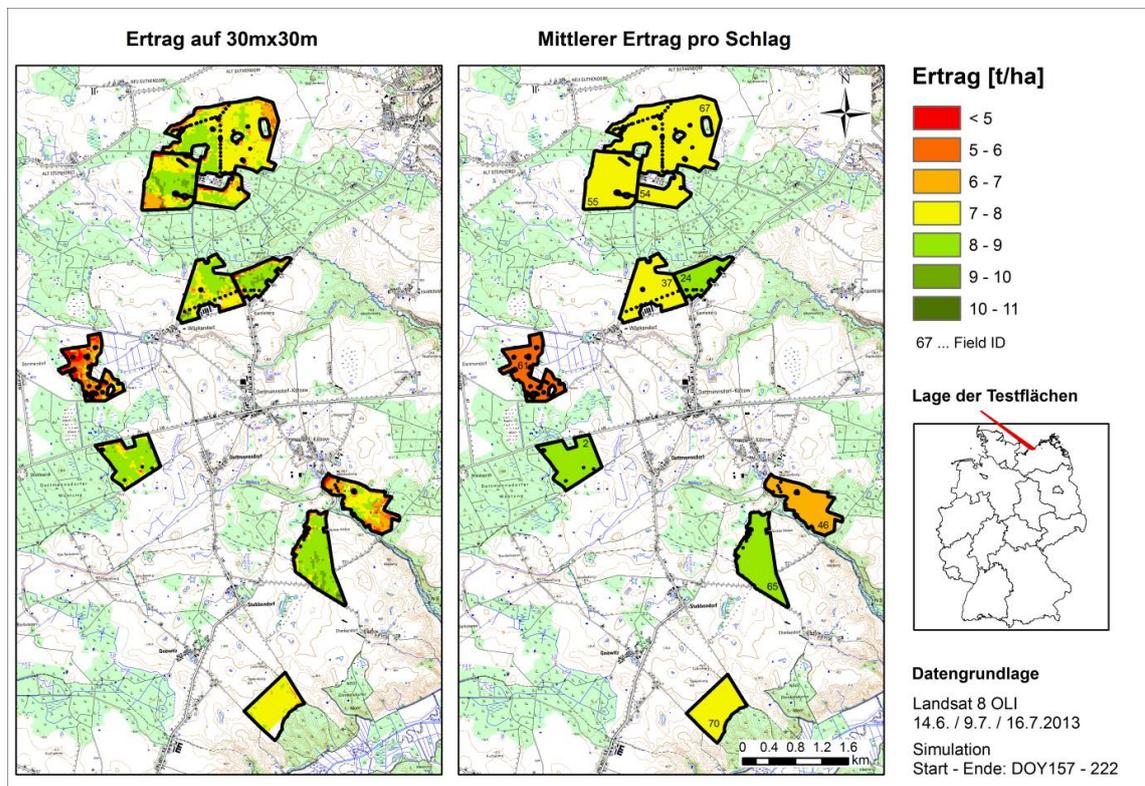


Abbildung 2: Ertragsschätzung basierend auf Landsat 8 OLI dargestellt entsprechend der räumlichen Auflösung der Bilddaten und als mittlerer Ertrag pro Schlag

Zusätzlich zu den Angaben über den mittleren Ertrag pro Schlag, ermöglicht der Einsatz von Fernerkundungsdaten Aussagen zur schlaginternen Variabilität der erzielten Erträge. Deren räumliche Differenzierung ist abhängig von der räumlichen Auflösung der verwendeten Satellitendaten. Im Falle von Landsat 8 OLI können Informationen in 30 m x 30 m Raster dargestellt werden (**Abbildung 2**). Die Validierung der schlaginternen Variabilität der fernerkundungsbasierten Schätzungen kann anhand von GPS-gestützten Ertragskartierungen erfolgen. Deren Fehler belaufen sich bei guter Kalibrierung auf etwa 2-4% (NOACK 2007). Allerdings findet eine Kalibrierung der Systeme aus Zeitgründen und Praktikabilität im laufenden Erntebetrieb häufig nicht statt. Ebenso finden Teilschnittbreiten selten Berücksichtigung, so dass Fehler von bis zu 20% auftreten. Probleme bei der korrekten Ertragserfassung treten auch bei Lagergetreide und Verschmutzungen der Sensoren auf. Letzteres ist insbesondere bei Raps ein großes Problem. Weitere Fehlerquellen sind Fehler bei der Positionsbestimmung sowie der Geschwindigkeitsmessung (NOACK 2007). Die mittlere Abweichung von 26.3% des mittleren Ertrages pro Schlag laut GPS-gestützter Ertragskartierung von den gewogenen Erträgen pro Schlag lässt diese Probleme auch für die hier zur Verfügung stehenden Ertragskarten der zehn Weizenschläge deutlich werden (**Tabelle 3**). Wie **Abbildung 3** zeigt, existieren dennoch Übereinstimmungen in der schlaginternen räumlichen Verteilung der fernerkundungsbasierten Schätzungen und den GPS-gestützten Ertragskarten.

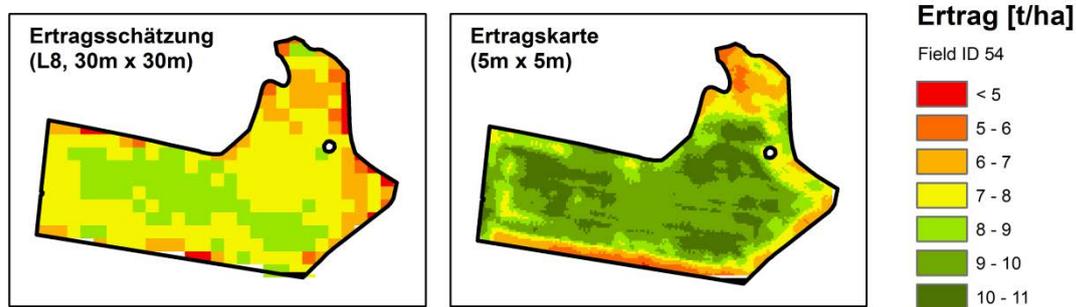


Abbildung 3: GPS-gestützte Ertragskartierung und Ergebnisse der Ertragsschätzung aus Fernerkundungsdaten (Landsat 8 OLI)

4 Zusammenfassung

In Vorbereitung auf die europäische Sentinel-2 Mission wurden auf Basis von Landsat 8 OLI Daten und einem Ansatz aus der Wachstumsmodellierung erfolgreich Ertragsschätzungen für ein Testgebiet in Mecklenburg-Vorpommern durchgeführt. Die geschätzten Erträge pro Schlag weichen im Mittel 6.4% von den gewogenen Erträgen pro Schlag ab. Zudem konnten Übereinstimmungen in der räumlichen Variabilität der Erträge pro Schlag im Vergleich zu GPS-gestützten Ertragskarten festgestellt werden. Untersuchungen zum Einfluss der spektralen Konfiguration der Sentinel-2 Daten auf die Vorhersagegenauigkeit der Vegetationsparameter lieferten vielversprechende Ergeb-

nisse. Die Eignung anderer Satellitensensorsysteme wie RapidEye wird derzeit getestet.

Weiterführende Analysen zum Einfluss der Aufnahmezeitpunkte und der Anzahl der Fernerkundungsdaten auf die Simulationsergebnisse sind erforderlich. Die Übertragbarkeit der Modelle auf andere Wintergetreidearten wird geprüft. Die Bereitstellung einer flächendeckenden Kulturartenklassifikation als Grundlage einer regionalen Ertragschätzung und einem Vergleich mit der amtlichen Statistik auf Landkreisebene ist vorgesehen.

Danksagung

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes RifIE, Regionale fernerkundliche Erfassung des landwirtschaftlichen Ertragspotentials durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Förderkennzeichen: 50EE1315) gefördert. Wir danken dem Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung der Daten zur Globalstrahlung. Darüber hinaus danken wir dem Landwirt für die freizügige Bereitstellung von Informationen zu den angebauten Feldfrüchten und erzielten Erträgen.

Literaturverzeichnis

- AGRSTATG (2014):** Gesetz über Agrarstatistiken (Agrarstatistikgesetz - AgrStatG), Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/agrstatg/index.html> (besucht am 8.3.2015)
- ATKIS BASIS-DLM (2013):** Digitales Basis-Landschaftsmodell des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS), Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2013
- BACH H., MAUSER W. (2003):** Methods and examples for remote sensing data assimilation in land surface process modelling, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol.41, No.7, 1629-1637.
- DWD (1981-2010):** Deutscher Wetterdienst, Langjähriges Niederschlagsmittel und langjähriger Mittelwert der Temperatur für die Station Groß Lüsewitz, URL: <http://www.dwd.de> (besucht am 8.3.2012)
- ESA (2015):** Sentinel-2 Color vision for Copernicus. URL: http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-2_150211.pdf
- FÖRSTER S., KADEN K., FÖRSTER M., ITZEROTT S. (2012):** Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. Computers and Electronics in Agriculture 89: 30-40
- LUNG (2005):** Beiträge zum Bodenschutz, Böden in Mecklenburg-Vorpommern, 2. Auflage, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern.
- MARTENS H., NÆS T. (1989):** Multivariate calibration. John Wiley & Sons Ltd., Guildford, GB
- MONSI M., SAEKI T. (2005):** On the factor light in plant communities and its importance for matter production. Annals of Botany 95: 549-567
- MONTEITH J.L. (1977):** Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences 281: 277-294

- NOACK P.O. (2007):** Ertragskartierung um Getreideanbau, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, KTBL-Heft 70
- RICHTER R. (2000):** Atmospheric and topographic correction: Model ATCOR3, DLR-IB 564-03/00, DLR Wessling, Germany.
- ROY D.P., WULDER M.A., LOVELAND T.R., WOODCOCK C.E., ALLEN R.G., ANDERSON M.C., HELDER D., IRONS J.R., JOHNSON D.M., KENNEDY R., SCAMBOS T.A., SCHAAF C.B., SCHOTT J.R., SHENG Y., VERMOTE E.F., BELWARD A.S., BINDSCHADLER R., COHEN W.B., GAO F., HIPPLE J.D., HOSTERT P., HUNTINGTON J., JUSTICE C.O., KILIC A., KOVALSKYY V., LEE Z.P., LYM-BURNER L., MASEK J.G., MCCORKEL J., SHUAI Y., TREZZA R., VOGELMANN J., WYNNE R.H., ZHU Z. (2014):** Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145: 154-172
- SZEICZ G. (1974):** Solar radiation for plant growth. *Journal of Applied Ecology* 11(2): 617-637
- UNO Y., PRASHER S., LACROIX R., GOEL P., KARIMI Y., VIAU A., PATEL R. (2005):** Artificial neural networks to predict corn yield from Compact Airborne Spectrographic Imager data. *Computer and Electronics in Agriculture* 47: 149-161.
- WOODCOCK C.E., ALLEN R., ANDERSON M., BELWARD A., BINDSCHADLER R., COHEN W.B., GAO F., GOWARD S.N., HELDER D., HELMER E., NEMANI R., OREOPOULOS L., SCHOTT J., THENKABAIL P.S., VERMOTE E.F., VOGELMANN J., WULDER M.A., WYNNE R. (2008):** Free access to Landsat imagery. *Science*, 320: 1011
- WULDER M.A., MASEK J.G., COHEN W.B., LOVELAND T.R., WOODCOCK C.E. (2012):** Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment* 122: 2-10
- ZARCO-TEJADA P., USTIN S., WHITING M. (2005):** Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal* 97(3): 641-653
- ZHEN G., MOSKAL L.M. (2009):** Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* 9: 2719-2745
- ZHENG B., CHENU K., DOHERTY A., CHAPMAN S. (2014):** The APSIM-Wheat Module (7.5R3008), March 25, 2014
- ZHU Z., WOODCOCK C.E. (2012):** Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* 118: 83-94

Micro-UAV und neue leichtgewichtige Multispektralsensoren für agronomische Anwendungen

Micro-UAV and new ultra-light, multispectral sensors for agronomic applications

Sonja Läderach, Natalie Lack, Stephan Nebiker

Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, 4132 Muttenz, Schweiz

Email: solae@gmx.ch, natalie.lack@fhnw.ch, stephan.nebiker@fhnw.ch

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Fernerkundung mittels Micro-UAV und leichtgewichtigen Multispektralsensoren im Anwendungsgebiet der Landwirtschaft. Dabei werden mehrere leichtgewichtige Multispektralsensoren für UAVs im Low-Cost- und im High-End-Bereich auf ihre Eignung für agrarische Untersuchungen untersucht. Für die Serie von Befliegungen unterschiedlicher ackerbaulicher und gemüsebaulicher Kulturen werden hyperspektrale und agrarische Referenzdaten einbezogen.

Die Untersuchungen zeigen, dass der speziell für agrarische Anwendungen entwickelte Mehrkopf-Multispektralsensor multiSPEC 4C eine sehr gute Übereinstimmung mit den bodengestützten Feldspektrometermessungen aufweist. Die agrarwissenschaftlichen Untersuchungen bestätigen das große Potential UAV-basierter Multispektralsensoren, beispielsweise bei der Ertragsabschätzung und der Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts von Raps oder bei hohen geometrischen Auflösungen von bis zu 2.5 cm für die Vitalitätsbeurteilung bei Kulturen wie Kartoffeln oder auch Zwiebeln. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass mittels Micro-UAV Krankheitsbefall innerhalb von landwirtschaftlichen Flächen frühzeitig erkannt werden kann - und dies auch bei Pflanzen mit kleinem Blattwerk. Die Untersuchungen zeigen zudem die zentrale Bedeutung der Befliegungszeitpunkte auf, die auf die spezifische agrarische Fragestellung abgestimmt sein müssen.

Deskriptoren: UAV, Multispektraldaten, Fernerkundung, Agronomie, Gemüsebau, Ackerbau, Ernteprognosen, Pflanzenvitalität, NDVI, Vegetationsindices

Abstract: *The present article covers remote sensing using micro-UAV and lightweight multi-spectral sensors in the application area of agriculture. Several lightweight, multi-spectral sensors for UAVs ranging from low-cost to high-end solutions are examined with respect to suitability for agricultural studies. Complementing the multispectral flight campaigns for different crops, terrestrial hyperspectral data and farming factors were collected as reference data.*

The investigations show that the measurements with the multi-head multi-spectral sen-

sor multiSPEC 4C, which was developed especially for agricultural applications, match very well with ground-based field spectrometer measurements. The agronomic investigations confirm the great potential of UAV-based multi-spectral sensors. This is shown by the examples for crop yield estimation and the determination of the ideal date for harvesting as well as examples with high geometric resolution of up to 2.5 cm for the assessment of vitality in crops of potato or onion. An important finding is that using micro-UAV enables early detection of diseases on farmland - and this even for plants with small leaves. The study also shows the importance of the image acquisition dates which must be adjusted to the agrarian question.

Keywords: UAV, multispectral data, remote sensing, agriculture, vegetable crops, harvesting forecast, plant vitality, NDVI, vegetation indices

1 Einleitung

Mini- und Mikro-UAVs erleben seit ein paar Jahren einen enormen Aufschwung und sind auf dem Weg, sich als Standard-Plattform für verschiedenste Anwendungen zu etablieren. Wegen der frühen Verfügbarkeit kostengünstiger und leichter RGB-Kameras, dominierten dabei in der Forschung und Praxis lange Zeit photogrammetrische bzw. primär geometrie-orientierte Fragestellungen. Demgegenüber waren multispektrale oder sogar hyperspektrale Sensoren lange Zeit zu groß und zu schwer für einen Einsatz auf Mini- oder sogar Mikro-UAVs. In der zweiten Hälfte der 00er-Jahre konnte mit Hilfe selbst entwickelter Forschungsprototypen von Multispektralsensoren das große Potential sehr hoch aufgelöster UAV-basierter multispektraler Fernerkundung in der Agronomie demonstriert werden (ANNEN *et al.* 2007, BARMETTLER *et al.* 2010, NEBIKER *et al.* 2008). Mehr als ein halbes Jahrzehnt später sind nun leichtgewichtige Multispektralsensoren für Mikro-UAVs auch kommerziell verfügbar, wobei das Spektrum von einfachen, kostengünstigen Multispektral-Kameras aus dem Consumer-Bereich bis hin zu komplexen und kostspieligen Mehrkopf-Sensorsystemen reicht.

In Zusammenarbeit mit dem Landwirtschaftlichen Zentrum Liebegg des Kantons Aargau (Schweiz) wurden im Rahmen einer Masterarbeit in Geoinformationstechnologie an der Fachhochschule Nordwestschweiz in Muttenz (Schweiz) verschiedene Anwendungsfälle der Präzisionslandwirtschaft in Intensivkulturen, im Gemüsebau sowie für landwirtschaftliche Versuchsfelder untersucht, wovon einige Beispiele hier vorstellt werden.

2 Problemstellung

Zahlreiche Forschungsarbeiten widmen sich den UAV-Plattformen als solche. Eine aktuelle Übersicht über UAV-Plattformen im Bereich Photogrammetrie und Fernerkundung bieten COLOMINA & MOLINA (2014). Eine sehr hilfreiche Systematik zur Kategorisierung von boden- und luftgestützten Sensorplattformen im Bereich der agronomischen Forschung des Precision Farmings findet sich zudem in ZECHA *et al.* (2013). In den letzten

Jahren beschäftigten sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Entwicklung und Validierung spezifischer Bildsensoren für zivile Mini- und Micro-UAVs, angefangen bei frühen leichtgewichtigen Multispektralsensoren (NEBIKER *et al.* 2008) mit einem zunehmenden Fokus auf hyperspektralen Bildsensoren (MÄKYNEN *et al.* 2012, SUOMALAINEN *et al.* 2014). Untersuchungen zu konkreten, praxisrelevanten Anwendungen von hochauflösender multi- und hyperspektraler Fernerkundung in der Agronomie sind demgegenüber noch deutlich weniger zahlreich. Eine aktuelle Übersicht über Experimente mit UAVs zur Fernerkundung von Vegetation findet sich in SALAMI *et al.* (2014).

In diesem Beitrag werden die Eigenschaften und das Leistungspotential neuer leichtgewichtiger UAV-Multispektralsensoren sowie deren Anwendbarkeit auf ausgewählte Problemstellungen in der Agronomie untersucht. Die untersuchten Kameras umfassen eine High-End-Lösung mit einem Multi-Head-Sensorsystem (multiSPEC 4C der Firma senseFly AG) sowie zwei Multispektralkameras aus dem Consumer-Bereich (Canon S110 NIR sowie Canon S110 RE). Alle drei Sensoren können mit senseFly eBee Flächenflügel-UAVs geflogen werden. Die Untersuchungen wurden im Sommer 2014 in Zusammenarbeit mit dem Landwirtschaftlichen Zentrum Liebegg, Kanton Aargau (Schweiz) durchgeführt.

Die Untersuchungen sollten die folgenden Fragestellungen beantworten:

- 1) Was leisten kostengünstige leichtgewichtige Multispektralsensoren im Vergleich zu teureren High-End-Systemen? Und lohnen sich die deutlich höheren Investitionen?
- 2) Wie gut eignet sich die UAV-Fernerkundung für konkrete Anwendungsfälle in der agronomischen Forschung einerseits und der landwirtschaftlichen Praxis andererseits?

Im ersten Teil des Beitrags werden kurz die eingesetzten Multispektralsensoren mit den unterstützten Spektralbereichen und die unterschiedlichen Typen von Spektralfiltern vorgestellt. Für detailliertere Angaben und die Beantwortung der ersten Frage sei auf NEBIKER *et al.* (2015) verwiesen. Im vorliegenden Beitrag wird auf agronomischen Fragestellungen fokussiert.

3 Instrumentarium

3.1 UAV-Plattform

Die Datenerfassung erfolgte mittels eines Mikro-UAV vom Typ eBee der Firma senseFly (SENSEFLY 2014a). Es handelt sich dabei um eine sehr leichtgewichtige Starrflügel-Konstruktion mit einem elektrisch angetriebenen Push-Propeller (**Abbildung 1 & Tabelle 1**). Im Vergleich zu Multikopter-UAVs bietet die eBee eine geringere Windanfälligkeit, eine relativ große Flächenleistung sowie einen vollautonomen Betrieb, der kaum Pilotenkenntnisse erfordert.

Tabelle 1: Spezifikationen eBee
(SENSEFLY 2014a)

Legende:

Gewicht (inkl. Kamera)	ca. 700 g
Flügelspannweite	96 cm
Fluggeschwindigkeit	40-90 km/h
Windgeschwindigkeit	bis 45 km/h
Max. Flugzeit	50'



Abbildung 1: eBee Mikro-UAV der Firma senseFly

3.2 Multispektralsensoren

Für die Untersuchungen standen drei unterschiedliche, leichtgewichtige Multispektralsensoren zur Verfügung: zwei Low-Cost-Systeme Canon S110 NIR und S110 RE und ein High-End-System multiSPEC 4C in einer Prototypversion (**Abbildung 2**).

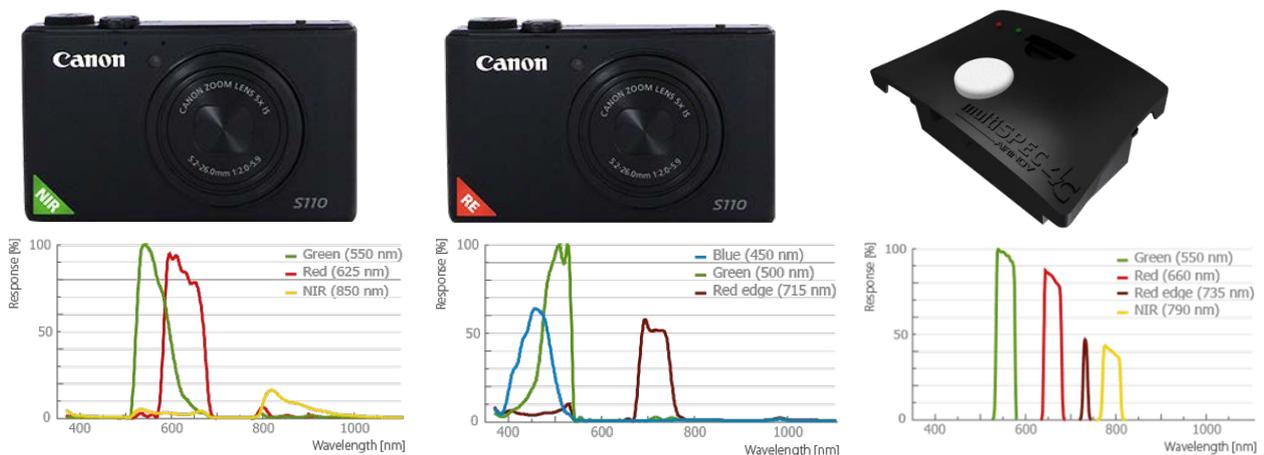


Abbildung 2: Canon S110 NIR (G, R, NIR), Canon S110 RE (B, G, Red Edge) & multiSPEC 4C (G, R, Red Edge, NIR) mit normalisierter Empfindlichkeit der Kanäle in [%] (SENSEFLY 2014b).

Im Gegensatz zu den Low-cost Systemen mit Einzeloptiken und modifizierten Bayerfiltern ist die MultiSPEC 4C ein Mehrkopfsystem mit vier Optiken und vier monochromatischen CCD-Sensoren. Die Farbtrennung erfolgt hier an der Optik über Bandpass- bzw. Interferenzfilter, wie dies bereits in früheren Multispektralsensoren für UAV realisiert wurde (NEBIKER *et al.* 2008, TETRACAM 2011). Über die Spezifikation von Zentralfrequenzen und Bandbreiten erlauben Bandpassfilter eine scharfe Extraktion der gewünschten Spektralbänder (**Abbildung 2 & Tabelle 2**). Als Spezialität weist die MultiSPEC 4C einen zusätzlichen Strahlungssensor in Zenitrichtung auf, dessen weiße Abdeckung in **Abbildung 2** gut sichtbar ist. Dieser Zenitsensor erlaubt eine zeitsynchrone Erfassung des einfallenden Sonnenlichts und dient als Referenzkanal zur Normalisierung der reflektierten Strahlung, die durch die vier nadirblickenden Spektursensoren erfasst wird.

Tabelle 2: Übersicht untersuchte UAV-Multispektralsensoren

Sensor Eigenschaft	Canon S110 NIR	Canon S110 RE	MultiSPEC 4C Prototyp	MultiSPEC 4C Commercial
Geom. Auflösung (Pixel pro Sensor)	12 MP (Bayermuster)	12 MP (Bayermuster)	4 Sensoren mit 0.4 MP	4 Sensoren mit 1.2 MP
Sensorgroße [mm]	7.44 x 5.58	7.44 x 5.58	4.51 x 2.88 (pro Sensor)	4.8 x 3.6 (pro Sensor)
Pixelgröße [µm]	1.33	1.33	3.75	
GSD bei 100 m AGL	3.5 cm	3.5 cm	20cm	10cm
Spektralkanäle (Zentralfrequenz / Bandbreite opt.) [nm]	G (550) R (625) NIR (850)	B (450) G (550) RE (715)	G (550 ± 20) R (660 ± 20) RE (735 ± 5) NIR (790 ± 20)	
Preis	ca. 1'000 €	ca. 1'000 €	Prototyp	ca. 9'000 €

3.2 Feldspektrometer

Für spektrale Referenzmessungen stand zudem ein kalibriertes, tragbares Feldspektrometer HandySpec Field der Firma tec5 zur Verfügung, welches speziell für die Messung diffuser Reflexions- und Emissionscharakteristika von Pflanzen und Bodenproben entwickelt wurde. Das Feldspektrometer erlaubt hyperspektrale Punktmessungen im Wellenlängenbereich von 360-1000 nm mit einer spektralen Auflösung von 3.3 nm. Das HandySpec-Feldspektrometer verfügt, wie der MultiSpec4C-Sensor über einen Referenzkanal im Zenit zur Kompensierung der zeitlichen Strahlungsunterschiede.

4 Untersuchungsgebiete und Datenerfassung

4.1 Versuchsfelder und agrarische Fragestellungen

Für die technischen und agrarwissenschaftlichen Untersuchungen wurden Versuchsfelder des Landwirtschaftlichen Zentrums Liebegg mit unterschiedlichen Kulturen befliegen. Abhängig von der jeweiligen Fragestellung wurden die Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichen Sensoren, geometrischen Auflösungen und nach Möglichkeit wiederholt befliegen. In der Folge wird eine Auswahl von Testgebieten und Befliegungen vorgestellt.

Rapsversuch

Befliegung vom 16.07.2014

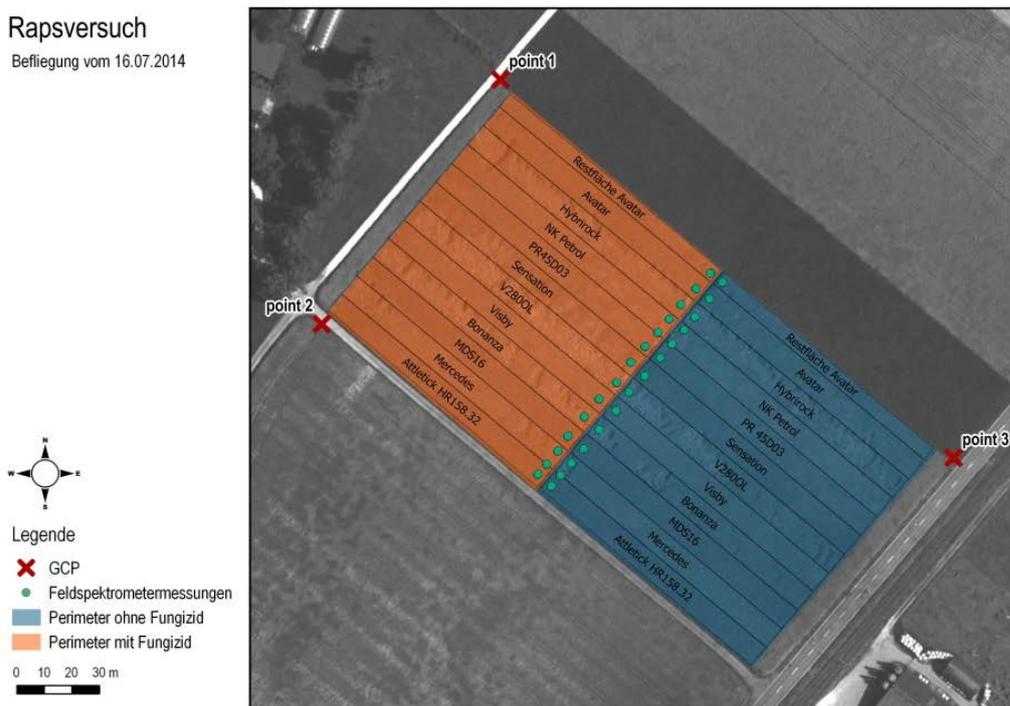


Abbildung 3: Raps-Sortenversuch mit Fungizidbehandlung (orange / links) und ohne Behandlung (blau / rechts).

Bei dem beflogenen Rapsfeld (**Abbildung 3**) handelt es sich um einen Sortenversuch mit elf Rapssorten, wobei nur die eine Hälfte mit Fungizid behandelt wurde. Zu den agrarwissenschaftlichen Fragestellungen gehören hier einerseits die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts, der auf Grund der vertikal verteilten, schlecht einsehbaren Schoten, von Auge nur sehr schwierig zu bestimmen ist, und andererseits sorten- und behandlungsabhängige Ertragsabschätzungen. Gleichzeitig diente dieses Testgebiet als Basis für die Sensorvergleiche.

In einem zweiten Versuchsgebiet konnten pro Befliegung gleich drei verschiedene Experimente erfasst werden:

- ein Weizensortenversuch mit unterschiedlichen Dünge-Strategien und dem Ziel der Ertragsabschätzung,
- ein Zuckerrübenfeld mit potentielltem Cercospora-Pilzbefall
- und ein Kartoffel-Sortenversuch mit potentieller Krautfäule und der Frage nach dem idealen Zeitpunkt der Krautvernichtung (**Abbildung 4**).

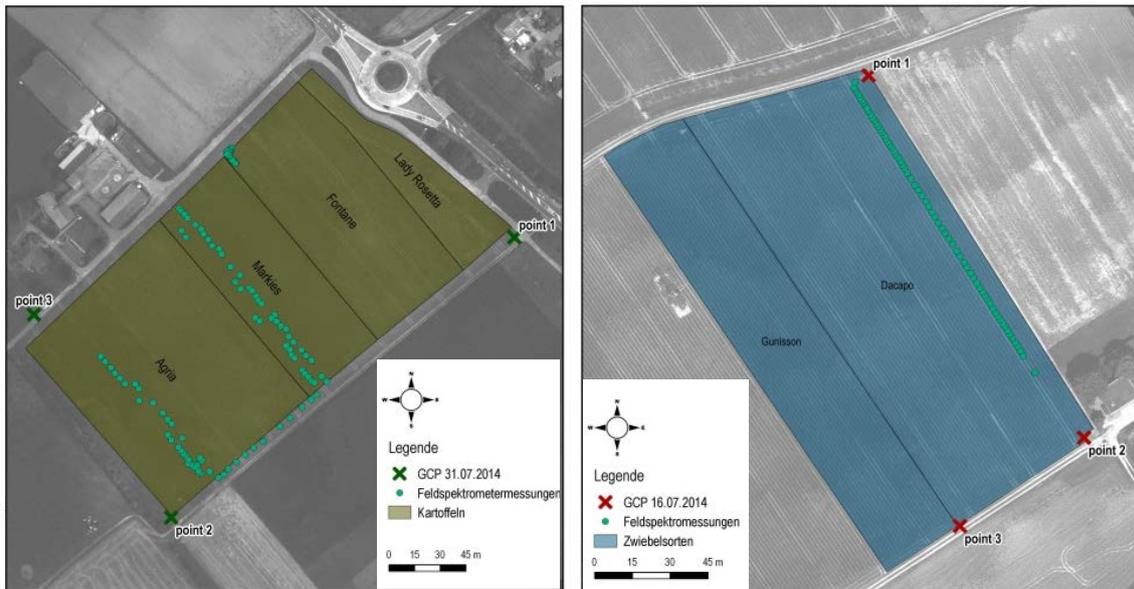


Abbildung 4: Kartoffelfeld (31.07.14) und Zwiebfeld (15.07.14) inklusive Standorte der Feldspektrometermessungen und der GCPs.

Schließlich konnten in einem dritten Versuchsgebiet (**Abbildung 4**) am Beispiel eines Zwiebfeldes Voruntersuchungen zur erforderlichen geometrischen Auflösung bei Kulturen mit geringen Blattflächen untersucht werden.

4.2 Datenerfassung (Befliegungen, Referenzdaten)

Die Datenerfassung erfolgte in einer Höhe von mindestens 80 m über Grund mit der Flächenflügel-Drohne eBee. Darauf wurden pro Flug eine der drei Multispektralkameras befestigt (**Abbildung 2**), welche detaillierte Bilder mit einer Auflösung von bis zu 2.5 cm pro Pixel lieferten. Während drei Tagen im Juli 2014 konnten sechs Versuchs- und Landwirtschaftsfelder mit den fünf Kulturen Raps, Weizen, Zuckerrüben, Kartoffeln und Zwiebeln befliegen werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt 24 Bildflüge à 20-40' mit 40-900 Bildern pro Flug, einer Gesamtflugzeit von ca. 12 Stunden und einem Total von 4735 Bildaufnahmen durchgeführt. Dabei kamen sowohl streifenweise als auch gekreuzte Befliegungsmuster zum Einsatz. Die Bodenauflösung betrug je nach Versuch und Fragestellung zwischen 10 cm und 2.5 cm. Limitierungen ergaben sich beim Einsatz der multiSPEC 4C, da erst ein Prototypsystem mit geringerer Sensordimension, reduzierter Pixelzahl, noch deutlich erhöhtem Stromverbrauch und zeitlich begrenzt zur Verfügung stand (von anfangs bis Mitte Juli 2014). Daher waren bei diesem System u.a. die Flugzeit limitiert und die minimale GSD auf 10 cm beschränkt. Für eine detaillierte Zusammenstellung wird auf LÄDERACH (2015) verwiesen.

Zusätzlich wurden auch hyperspektrale Punktmessungen mit einem Feldspektrometer durchgeführt, welche in Ergänzung zu den Bewirtschaftungs-, Zustands- und Ertragsin-

formationen des landwirtschaftlichen Zentrums Liebegg und der Landwirte als Referenzdaten dienen.

4.3 Datenaufbereitung

Die Prozessierung der Bilddaten erfolgte mit der Standardsoftware Postflight Terra 3D, die als Bestandteil des eBee Gesamtsystems mitgeliefert wird. Sie umfasst folgende Schritte:

- Bündelblockausgleichung unter Einbezug der aufgezeichneten Projektionszentren
- Lagerung des Bildblocks auf den GCPs
- Generierung einer 3D-Punktwolke bzw. eines Oberflächenmodells mittels Dense Image Matching
- Orthophotogenerierung und –mosaikierung
- Berechnung sogenannter Reflectance Maps
- Ableitung von Vegetationsindizes.

Gemäß Hersteller erfolgt die Generierung der Reflectance Maps in Postflight Terra unter Einbezug der überlappenden Bildinformation und unter Berücksichtigung richtungsabhängiger Effekte. Bei der multiSPEC 4C erfolgt vorgängig zur Prozessierung eine radiometrische Kalibrierung der einzelnen Kanäle mittels Aufnahmen einer speziellen Kalibriertafel, die unmittelbar vor der jeweiligen Befliegung gemacht werden. Im Unterschied zu den Daten der kostengünstigen Einkopfkameras, erfolgt die geometrische Prozessierung der multiSPEC-Daten separat pro Bildkanal, was eine Vervielfachung des Rechenaufwands bewirkt.

4.4 Verwendete Indices und Bildaufbereitung

Beim Raps- und Weizenversuch kann anhand der Parzellen mit genau definierter Größe und den vorhandenen Ertragsmengen (Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg) der von (REN *et al.* 2012) beschriebene Ansatz der Eruiierung der Beziehungen zwischen Ernteerträgen und Indizes verwendet werden. Für Ertragsschätzungen werden vor allem normalisierte Vegetationsindizes verwendet, wobei der NDVI und der GNDVI (GITELSON *et al.* 1996) am häufigsten eingesetzt werden (SHANAHAN *et al.* 2001, YANG & EVERITT 2002). Zusätzlich wurde in dieser Untersuchung der NDRE berechnet, um dessen Potential zu eruieren (**Tabelle 3**). Dieser Index sowie andere Red-Edge Indizes werden vor allem zur Detektion von Pflanzenstress verwendet (DASH & CURRAN 2007, EITEL *et al.* 2011, MAHLEIN *et al.* 2013). Allerdings konnten die Fragestellungen betreffend Krautfäule und Cercospora aufgrund von fehlenden Daten im Bereich des Red-Edge (zeitlich begrenzt zur Verfügung stehender MultiSPEC 4C Sensor) lediglich mit dem gängigen Vegetationsindex NDVI untersucht werden. Dasselbe gilt bei der Untersuchung der Zwiebeln.

Tabelle 3: Verwendete Vegetationsindizes

Indizes	Formel	Referenz
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	(ROUSE <i>et al.</i> 1974)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{NIR - Grün}{NIR + Grün}$	(GITELSON <i>et al.</i> 1996)
Normalized Difference Red-edge Index	$NDRE = \frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$	(BARNES <i>et al.</i> 2000)

Zudem musste bei den Zwiebeln sichergestellt werden, dass die kleinen Blätter der Pflanzen erfasst werden. Dies konnte mit den Canon S110 Kameras und einer Auflösung von 2.5cm erreicht werden, was allerdings gleichzeitig eine hohe Anzahl an Bodenpixel zur Folge hatte. Deshalb wurden die Pixel mittels überwachter Klassifikation (Minimum Distance Ansatz) in die Klassen „Zwiebel“ und „Boden“ aufgeteilt. Die anschließende Berechnung des NDVI und räumliche Untersuchung wurde nur mit den Pixeln der Klasse Zwiebel durchgeführt. TROUT *et al.* (2008) zeigen auf, dass der NDVI von verschiedenen Hortikulturen - darunter auch Zwiebeln - stark mit dem prozentualen Anteil an Blattfläche pro Flächeneinheit korreliert. Die Blattfläche soll laut den Autoren ein Indikator für das Wachstumsstadium und den Wasserbedarf sein.

5 Auswertungen

5.1 Vergleich zu Referenzmessungen

Für agrarische Fragestellungen weist der Multikopfsensor multiSPEC 4C eine wertvolle Kanalkombination von Grün, Rot, RedEdge und nahes Infrarot auf. Damit können die meisten relevanten, multispektralen Indizes berechnet werden, ohne verschiedene Flüge einzeln zusammenfügen zu müssen.

Die Untersuchungen zeigten zudem auf, dass der Multikopfsensor multiSPEC 4C eine genaue Bestimmung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) mit einer sehr guten Übereinstimmung mit den Resultaten aus den Feldspektrometermessungen erlaubt. Demgegenüber weisen die Ergebnisse mit der Canon-Kamera eine systematische Abweichung auf (**Abbildung 5**). Die grosse Streuung der Referenzmessungen ist auf die punktförmige Messung zurückzuführen, während dem die Vegetationsindizes aus den UAV-Messungen jeweils dem Mittelwert eines Umkreises mit 0.5 m Radius um den Standort der Feldspektrometermessungen entsprechen. Die systematisch zu tiefen Vegetationsindizes bzw. zu tiefen Vitalitätswerte aus den Messungen der Canon S110 Kompaktkameras lassen sich durch die unschärfere Trennung der Spektralbänder durch deren Mosaikfilter erklären.

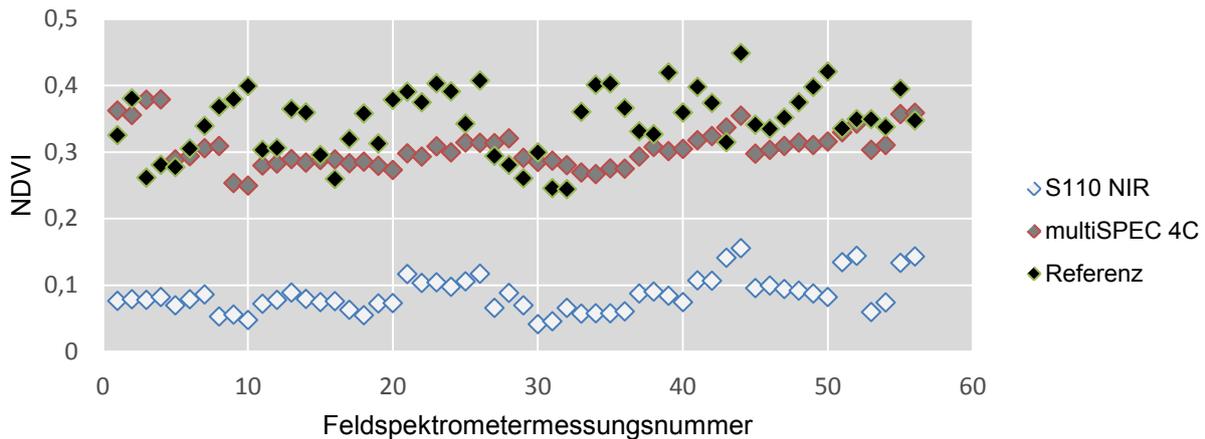


Abbildung 5: NDVI-Wertevergleich für multiSPEC 4C, Canon S110 NIR und Feldspektrometer für identische Testplots im Rapsversuch.

5.2 Schätzung von Ernteerträgen im Ackerbau

Im Falle des Rapsversuchs wurden mit Hilfe verschiedener Vegetationsindizes einerseits die Pflanzenvitalität unmittelbar vor der Ernte sowie deren Korrelation mit den gemessenen Ernteerträgen untersucht.

Obwohl die Befliegung wegen der schlechten Witterung im Sommer 2014 sehr spät, d.h. erst unmittelbar vor der Ernte erfolgte, zeigt die NDVI-Karte in **Abbildung 6** deutliche Vitalitätsunterschiede zwischen den einzelnen Sorten einerseits und eine höhere Vitalität des mit Fungizid behandelten Perimeters (Bildhälfte oben links) gegenüber dem unbehandelten Perimeter andererseits. Die meist höheren NDVI-Werte der behandelten Parzellen sind auch in **Abbildung 7** gut sichtbar. Offenbar führte die Fungizidbehandlung in diesem Fall zu einer Verlängerung der Pflanzenaktivität bis unmittelbar zum Erntezeitpunkt. Die Korrelation zwischen den Ernteerträgen und den NDVI-Werten beträgt bei den behandelten Parzellen 0.78, bei den unbehandelten nur 0.35. Beim Green Normalized Difference Vegetation Index GNDVI reduziert sich die Korrelation für behandelte Parzellen leicht auf 0.67, erhöht sich aber bei den unbehandelten auf 0.66.

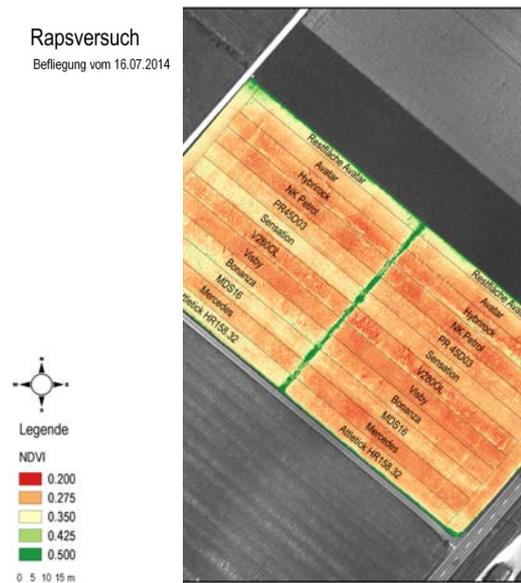


Abbildung 6: NDVI-Karte Rapsversuch (MultiSpec 4C, GSD 10 cm)

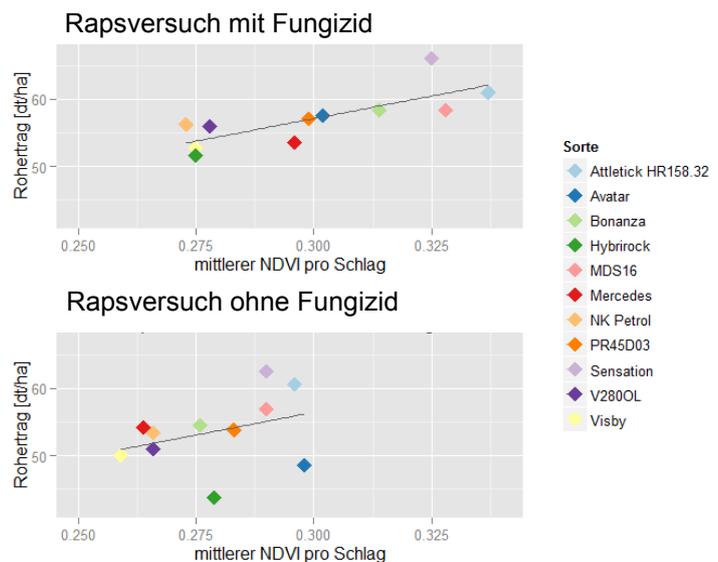


Abbildung 7: Rohrerträge [dt/ha] pro Versuchsparzelle und Sorte in Funktion des gemittelten NDVI-Werts pro Parzelle (oben: mit Fungizid-Behandlung, unten: ohne Behandlung)

Die Untersuchungen der Rapskulturen wurden in analoger Weise und mit einer ähnlichen Zielsetzung auf die umfangreichen Sorten- und Düngerversuche für Weizen übertragen. Zwar konnten auch dort die Reflexionseigenschaften und verschiedene Vegetationsindizes für die nur wenige Quadratmeter großen Testparzellen sehr gut abgeleitet werden. Auf Grund der vollständig abgereiften Kulturen zeigten die Multispektraldaten jedoch keine signifikanten Korrelationen mehr mit den Ertragsmessungen. Wie in LÄDERACH (2015) diskutiert wird, deckt sich diese geringe Korrelation im ausgereiften Stadium mit den Erkenntnissen verschiedener anderer Studien, u.a. von WANG (2014).

5.3 Schädlingsbefall im Gemüsebau

Da der Multikopsensor multiSPEC 4C Prototyp nur für eine kurze Zeit zur Verfügung stand und über längere Zeit die Witterung ungünstig war, konnten mit diesem Sensor keine Zeitreihen erfasst werden. So wurde für die Erfassung von Stresssituationen der Vegetation und deren Veränderung über die Zeit auf die Canon S110 Kameras zurückgegriffen, welche zudem im Vergleich zum multiSPEC 4C Prototyp eine höhere Auflösung ermöglichten.

Erste Untersuchungen im Gemüsebau bestätigten am Beispiel von Zwiebeln das Potential hoher geometrischer Auflösungen im Zentimeterbereich. So zeigte ein Vergleich von Multispektraldaten mit GSD von 5 cm und 2.5 cm, dass mit der feineren Auflösung eine sehr effiziente Trennung des feinen Blattwerks vom Hintergrund möglich ist, und dass dadurch eine signifikante Verbesserung der Aussagen zur Pflanzenvitalität möglich wird.

In den Bilddaten mit einer räumlichen Auflösung von 2.5 cm konnte mit einer automatischen Klassifikation die Zwiebelpflanzen vom Boden unterschieden werden. Dies ermöglichte die Unterscheidung zwischen den zwei Sorten (Gunisson und Dacapo). Die deutliche Abnahme des NDVI Wertes von Mitte bis Ende Juli konnte mit großer Wahrscheinlichkeit dem, trotz Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln, fortschreitenden Thripsbefall zugeordnet werden (**Abbildung 8**).

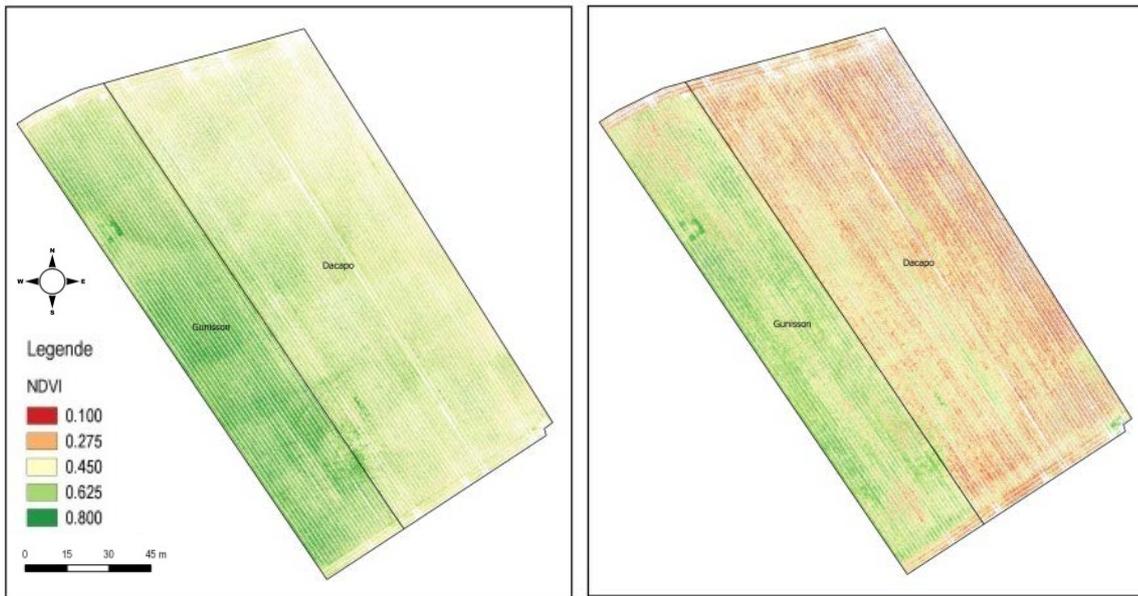


Abbildung 8: NDVI des mit Thrips befallenen Zwiebelfeldes vom 16. Juli (links) und 31. Juli 2014 (rechts). Grün = vitale Pflanze, rot = kranke/geschädigte Pflanze (Canon S110 NIR, GSD 2.5 cm).

Beim Kartoffelversuch lassen sich sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Befliegung die vier Sorten voneinander unterscheiden. Die spät reifende Sorte Markies in der Mitte des Feldes weist bei beiden Befliegungen die höchste Vitalität auf. Dies und die Tatsache, dass bei allen vier Kartoffelsorten eine Abnahme des NDVI-Wertes von Mitte zu Ende Juli detektiert wurde, könnte ein Indiz sein, dass hierbei aufgrund des NDVI auf den Reifezustand geschlossen werden kann.

Zudem sind unregelmässige Muster in den Multispektraldaten zu erkennen. So ist der punktuelle Ausbruch der Krautfäule Mitte Juli in der Sorte Fontane (**Abbildung 9**, links) in den Bilddaten gut ersichtlich und konnte vom Landwirt verifiziert werden. Beim zweiten Befliegungszeitpunkt Ende Juli konnte die Ausbreitung des Befalls weiter verfolgt werden. Auf den NDVI-Bildern (**Abbildung 9**, rechts) ist unter anderem ein streifiges Ausbreitungsmuster zu erkennen, welches sich nicht mit den Fahrspuren deckt. In Rücksprache mit dem Bewirtschafter konnte dies mit einem zu kurzen Applikationsarm erklärt werden, wodurch Teile des Feldes nicht genügend mit dem Fungizid gegen die Krautfäule behandelt wurden.

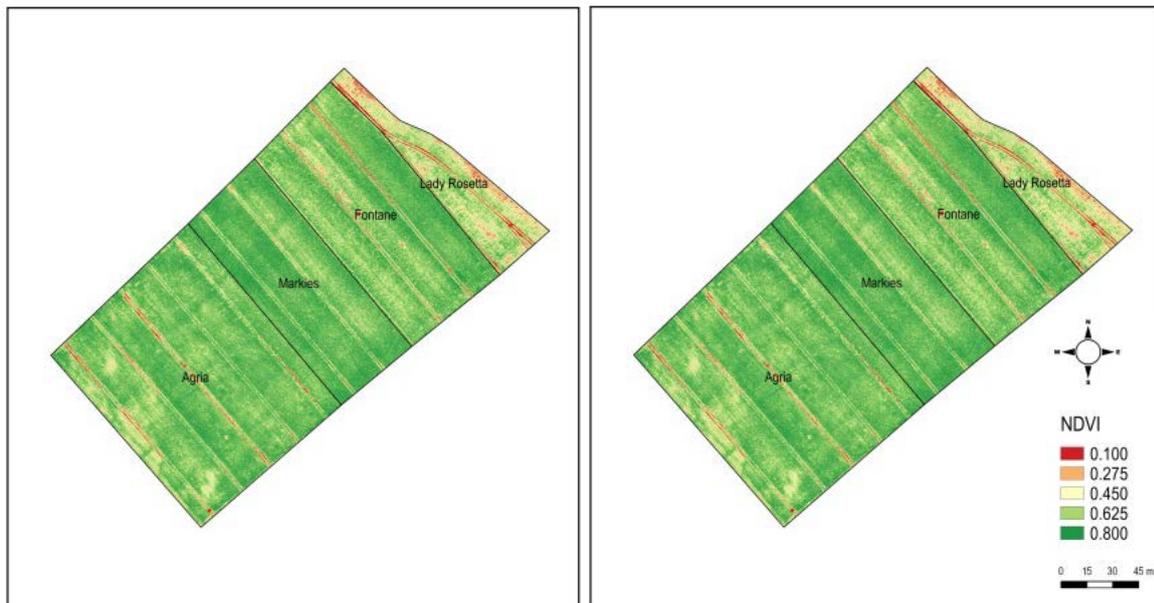


Abbildung 9: NDVI des mit Krautfäule befallenen Kartoffelfeldes vom 17. Juli (links) und 31. Juli 2014 (rechts). Grün = vitale Pflanze, rot = kranke/geschädigte Pflanze (Canon S110 NIR, GSD 5 cm).

6 Fazit und Ausblick

In den Untersuchungen überzeugte der Multikopfsensor multiSPEC 4C durch die genaue Bestimmung des NDVI im Vergleich zur Referenz aus der Feldspektrometermessung. Zudem bietet der Multikopfsensor eine für agronomische Fragestellungen wertvolle Kanalkombination, da die relevantesten multispektralen Vegetationsindizes damit berechnet werden können (NEBIKER 2015). Für qualitative Untersuchungen wie zum Beispiel die Detektion von Pflanzenstress und deren Veränderung über die Zeit erwiesen sich die Canon S110 Multispektralsensoren als nützlich.

Mit den erfassten Daten konnten agrarische Fragestellungen zu Ertragsschätzung bei Raps und Weizen, Stressdetektion mit zeitlichem Krankheitsverlauf bei Zuckerrüben, Kartoffeln und Zwiebeln, sowie eine Sortenklassifikation bei Weizen untersucht werden.

Erste Untersuchungen zur Ertragsschätzung mittels Multispektraldaten zeigen beim Raps eine hohe Korrelation zwischen den NDVI- und GNDVI-Werten und den Referenz-Ertragsmessungen trotz des späten Befliegungszeitpunkts unmittelbar vor der Ernte. Beim Weizen hingegen kann unmittelbar vor der Ernte keine signifikante Korrelation zwischen spektralen Eigenschaften und den Erträgen mehr festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die Feldspektrometermessungen als auch für die Multispektraldaten aus den Befliegungen. Die teilweise geringen Korrelationen zwischen Rohertrag und Index könnten durch frühere Befliegungszeitpunkte verbessert werden.

Bei Fragestellungen im Gemüsebau zeigen die sehr hohen geometrischen Auflösungen von bis zu 2.5 cm pro Pixel grosses Potential bei der Beurteilung von Kulturen mit geringer Blattoberfläche. So konnte aus den Multispektraldaten neben Krautfäule bei Kar-

toffeln auch der Thripsbefall bei Zwiebeln frühzeitig detektiert und die weitere Ausbreitung erfasst werden. Mit Kenntnis kleiner Brandherde in großen Feldern könnten frühzeitig und gezielt Maßnahmen gegen die weitere Ausbreitung des Befalls ergriffen werden. Es konnte bestätigt werden, dass bei der Bestimmung der Pflanzenfitness dem NDVI eine zentrale Bedeutung zukommt.

Für die untersuchten Anwendungsfälle konnten Empfehlungen bezüglich eines optimierten Vorgehens, zu verwendendem Instrumentarium und idealen Befliegungszeitpunkten für weiterführende Untersuchungen abgegeben werden. Fundierte feldbezogene Kenntnisse und Referenzdaten sind dabei zentrale Faktoren für eine anschließende zuverlässige Interpretation der Bilddaten.

Auf Grund der Ergebnisse aus dem vorliegenden Projekt und basierend auf weiteren Studien zur luft- und satellitengestützten Fernerkundung in der Agronomie konnten wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Untersuchungen gewonnen werden, insbesondere mit Blick auf ideale Reifestadien und Befliegungszeitpunkte für Analysen der Pflanzendüngung, für zuverlässige zukünftige Ertragsabschätzungen und für die frühzeitige Erkennung von Pflanzenstress. Das vorgestellte High-End-System mit seinen vier Spektralkanälen und einer höheren geometrischen Auflösung in der definitiven Fassung bietet dazu ein geeignetes Instrumentarium.

Literaturverzeichnis

- ANNEN A., NEBIKER S., OESCH D. (2007):** Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung. Dreiländertagung der SGPBF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert. FHNW, Muttenz: DGPF Tagungsband Nr. 16: 399–406.
- BARMETTLER A., NEBIKER S., KOCH CH. et al. (2010):** airAGro – Fernerkundungslösung für die Agronomie auf der Basis von Leichtflugzeugen und Minidrohnen. DGPF Tagungsband 19/2010 – Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPBF. Wien: 156–164.
- BARNES E.M., CLARKE T.R., RICHARDS S.E. et al. (2000):** Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. Bloomington, MN, USA.
- COLOMINA I., MOLINA P. (2014):** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 92: 79–97, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- DASH J., CURRAN P.J. (2007):** Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research* 39 (1): 100–104.
- EITEL J.U.H., VIERLING L.A., LITVAK M.E., LONG D.S., SCHULTHESS U., AGER A.A., KROFCHECK D.J., STOSCHECK L. (2011):** Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. *Remote Sensing of Environment* 115 (2): 3640–3646.
- GITELSON A.A., KAUFMAN Y.J., MERZLYAK M.N. (1996):** Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58 (3): 289–298.

- LÄDERACH S. (2015):** Fernerkundung in der Agronomie mit Micro-UAV und neuen leichtgewichtigen Multispektralsensoren. Masterthesis. FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz.
- MÄKYNEN J., SAARI H., HOLMLUND CH. et al. (2012):** Multi- and hyperspectral UAV imaging system for forest and agriculture applications. Druy, Mark A.; Crocombe, Richard A. (eds.) SPIE 8374, Next-Generation Spectroscopic Technologies V, 837409 (May 1, 2012): 837409–837409–9, DOI: 10.1117/12.918571.
- MAHLEIN A.-K., RUMPF T., WELKE P., DEHNE H.-W., PLÜMER L., STEINER U., OERKE E.-C. (2013):** Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sens. Environ.* 128: 21–30.
- NEBIKER S., LÄDERACH S., MATTI E. (2015):** Neue leichtgewichtige Multispektralsensoren für Micro-UAVs – Sensorvergleiche und Leistungsuntersuchungen in der Agronomie. DGPF Tagungsband 24/2015, Köln: 35-44.
- NEBIKER S., ANNEN A., SCHERRER M., OESCH D. (2008):** A Light-weight Multispectral Sensor for Micro UAV – Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, China: ISPRS: 1193–1200.
- REN X., XU W., SMITH A. (2012):** Remote sensing, crop yield estimation and agricultural vulnerability assessment: A case of Southern Alberta. *The Open Hydrology journal* 6: 68–77.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W. (1974):** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium. Washington, DC: NASA: 309–317.
- SALAMÍ E., BARRADO C., PASTOR E. (2014):** UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing*. 6 (11): 11051–11081, DOI: 10.3390/rs6111051.
- SHANAHAN J.F., SCHEPERS J.S., FRANCIS D.D., VARVEL G.E., WILHELM W.W., TRINGE J.M., SCHLEMMER M.R., MAJOR D.J. (2001):** Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal* 93 (3): 583–589.
- SENSEFLY (2014a):** eBee - The Professional Mapping Drone (Technical Specifications).
- SENSEFLY (2014b):** eBee Ag Camera Comparison.
https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/images/eBee-Ag-Cameracomparision.jpg.
- SUOMALAINEN J., ANDERS N., IQBAL S. et al. (2014):** A Lightweight Hyperspectral Mapping System and Photogrammetric Processing Chain for Unmanned Aerial Vehicles. In: *Remote Sensing*. 6 (11): 11013–11030, DOI: 10.3390/rs6111013.
- TETRACAM (2011):** Tetracam Mini-MCA. http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm.
- TROUT T.J., JOHNSON L.F., GARTUNG J. (2008):** Remote sensing of canopy cover in horticultural crops. *HortScience*. 43 (2): 333–337.
- WANG L. et al. (2014):** Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. *Field Crops Research*, 164: 178–188.
- YANG C., EVERITT J. (2002):** Relationships Between Yield Monitor Data and Airborne Multidate Multispectral Digital Imagery for Grain Sorghum. *Precision Agriculture* 3 (4): 373–388.
- ZECHA C., LINK J., CLAUPEIN W. (2013):** Mobile sensor platforms: categorisation and research applications in precision farming. *Journal of Sensors and Sensor Systems*. 2: 51–72, DOI: 10.5194/jsss-2-51-2013.

Automatische Erkennung von Pflanzenkrankheiten mit dem Smartphone

Automated Detection of Plant Diseases via Smart Phone

Benjamin Klatt¹, Thomas Klein¹, Benno Kleinhenz¹, Christian Bauckhage², Marion Neumann², Kristian Kersting³, Erich-Christian Oerke⁴, Lisa Hallau⁴, Anne-Katrin Mahlein⁴, Ulrike Steiner⁴, Manfred Röhrig⁵

¹ Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), Rüdesheimer Str. 60-68, 55545 Bad Kreuznach, Email: klatt@zepp.info

² Bonn-Aachen International Center for Information Technology (B-IT), Universität Bonn, Dahlmannstraße 2, 53113 Bonn

³ Fakultät für Informatik, Technische Universität Dortmund, 44220 Dortmund

⁴ Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Universität Bonn, Meckenheimer Allee 166a, 53115 Bonn

⁵ Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP), Rüdesheimer Str. 60-68, 55545 Bad Kreuznach

Zusammenfassung: Mit der SmartDDS-App lassen sich fünf verschiedene Erreger von Blattfleckenkrankheiten in Zuckerrüben mit dem Smartphone automatisch unterscheiden.

Deskriptoren: Smartphone, App, Zuckerrübe, Blattflecken-krankheiten

Abstract: *The SmartDDS app allows to differ five agents of foliar diseases in sugar beet automatically via smart phone.*

Keywords: *smart phone, app, sugar beet, foliar diseases*

In diesem dreijährigen Vorhaben haben es sich die Projektpartner zum Ziel gesetzt, eine mobile Applikation zu entwickeln, die es ermöglicht, Blattfleckenkrankheiten in Zuckerrüben mit Hilfe eines Android-fähigen Smartphones oder Tablet-PCs automatisch zu detektieren und zu identifizieren.

Die Funktionsweise dieser App kann wie folgt beschrieben werden. Mit der, in den mobilen Endgeräten eingebauten, Kamera werden Blattflecken auf Blättern fotografiert. Die Vorverarbeitung erfolgt auf dem mobilen Endgerät, so dass nur die Bildausschnitte der befallenen Blattregionen zur weiteren Verarbeitung an einen Server geschickt werden. Dadurch wird das zu sendende Datenvolumen erheblich verringert, was sowohl die Übertragung als auch die weitere Analyse beschleunigt. Sollte auf dem Feld kein mobi-

les Internet zur Verfügung stehen, kann der Nutzer die aufgenommenen Fotos zu einem späteren Zeitpunkt, an einem Ort mit Netzanbindung versenden. Auf dem Server werden die, in den befallenen Regionen enthaltenen, Merkmale extrahiert und mit Bildanalyseverfahren aus der Informationstechnologie ausgewertet, so dass sie einer vorher festgelegten Klasse, einer bestimmten Krankheit, zugeordnet werden können. Nach nur wenigen Sekunden erhält der Nutzer die Diagnose und kann über die App Entscheidungshilfesysteme wie z.B. Cercbet (www.isip.de) aufrufen, um sich den weiteren Befallsverlauf prognostizieren zu lassen und Behandlungsempfehlungen einzuholen.

Derzeit kann die Applikation mit einer Treffsicherheit von mehr als 83% fünf verschiedene Blattfleckenkrankheiten unterscheiden. Erreger dieser Krankheiten sind die Pilze *Cercospora beticola*, *Ramularia beticola*, *Uromyces betae* und *Phoma betae* sowie das Bakterium *Pseudomonas syringae* pv. *aptata*. Symptome, die detektiert jedoch nicht einem der genannten Erreger zugeordnet werden können, werden einer zusätzlichen Klasse zugerechnet.

Als nächstes soll der Erkennungsalgorithmus auf Blattfleckenkrankheiten im Getreide ausgeweitet werden.

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Konfigurationsmöglichkeiten und Datenkonzepte des *Multiwavelength Line Profiling (MWLP)* Systems

Configuration and Image Data Concepts of the Multiwavelength Line Profiling (MWLP) System

Wolfram Strothmann¹, Vadim Tsukor¹, Joachim Hertzberg², Arno Ruckelshausen¹

¹ Hochschule Osnabrück, Competence of Applied Agricultural Engineering (COALA), Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück

Email: w.strothmann@hs-osnabrueck.de.

² Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Robotics Innovation Center, Außenstelle Osnabrück, Albert-Einstein-Str. 1, 49076 Osnabrück.

Kurzfassung: Der Ansatz des Multiwavelength Laser Line Profile Sensing ist ein neuartiges Sensorkonzept, welches durch die Autoren konzipiert, entwickelt und umgesetzt wurde. Das MWLP-System bietet, durch Erfassung von Laser-Linienprofilen bei mehreren, verschiedenen Wellenlängen und deren Zusammenführung basierend auf optischem Tracking, die Möglichkeit, 3D-Informationen zusammen mit Spektralinformationen bei verschiedenen, anwendungsspezifisch wählbaren Wellenlängen zwischen ca. 400 und 1000 nm zu erfassen. Dabei können sowohl Reflexionseigenschaften als auch Rückstreuungsmerkmale der zu untersuchenden Objekte bildgebend bei verschiedenen Wellenlängen erfasst werden. Rückstreuungswerte sind vor allen für wasserreiche Objekte bei Wellenlängen zwischen 600 und 1000 nm von Interesse, da hier der Laser auch z. T. in das Objekt eindringt und schließlich unter der Oberfläche zurückgestreut wird. Somit lassen sich hier auch Merkmale, welche sich leicht unterhalb der Oberfläche manifestieren, mittels des Sensorsystems bildgebend adressieren.

Deskriptoren: Multiwavelength, Laser, Rückstreuung, Lichtschnitt

Abstract: *The Multiwavelength Laser Line Profile Sensing approach is a novel sensing concept, designed and realized by the authors. The MWLP-System offers – by capturing and detecting multiple laser line profiles at different wavelength and their assembly based on optical tracking – the possibility to collect 3D – information along with spectral information at multiple, selectable wavelengths using a single sensor system. Line lasers with wavelengths in the range between 400 and 1000 nm can be chosen. Thereby, data of reflexion and backscattering of the objects are collected at multiple wavelength in an image-based manner. Backscattering is particularly of interest for objects with high water content in the wavelength range between 600 and 1000 nm. In this band the laser partly enters the object and is scattered back beneath*

the surface. Consequently, even some properties that manifest beneath the surface can be addressed for such objects using the MWLP-System.

Keywords: *Multiwavelength, Laser, Backscattering, Line Profile sensing*

1 Einleitung

Lasertriangulation zur Distanzmessung ist ein weitverbreitetes Verfahren und vielfältig in industriellen Anwendungen eingesetztes Verfahren zur hoch genauen 3D-Messung. Auch im Agrarbereich wird es in zunehmendem Maße eingesetzt (PAULUS *et al.* 2014). Hierbei tritt allerdings das Problem auf, dass häufig neben 3D-Abstandsinformationen auch spektral-selektive Reflexionseigenschaften der zu untersuchenden Objekte benötigt werden. Dies führt häufig zum Einsatz von Multisensorlösungen, bspw. Im Bereich der Phänotypisierung (BUSEMEYER *et al.* 2013). Damit verbunden sind allerdings Probleme hinsichtlich Kalibrierung und erschütterungsfreien Justage der Sensoren zu einander. Aus dieser Problemstellung heraus entstand die Idee für ein neuartiges Sensorsystem, welches 3D-Informationen zusammen mit Reflexionseigenschaften und Rückstreuungsmerkmalen in einem einzelnen Scandurchlauf mit einem Sensorsystem erfassen kann (STROTHMANN *et al.* 2014).

2 Systemaufbau MWLP-System

Das *Multiwavelength Line Profiling* (MWLP) System besteht aus einer High-Speed Monochrom-Kamera und mehreren, hintereinander angeordneten *continuous-wave* (CW) Linienlasern. Die Kamera vom Typ Baumer HXG20NIR liefert 105 fps bei ihrer vollen Auflösung von 2048x1088. Die Framerate der Kamera mit CMOS Bildsensor kann bei herabgesetzter Auflösung noch gesteigert werden. Der Aufbau des MWLP-Systems wird in **Abbildung 1** gezeigt.

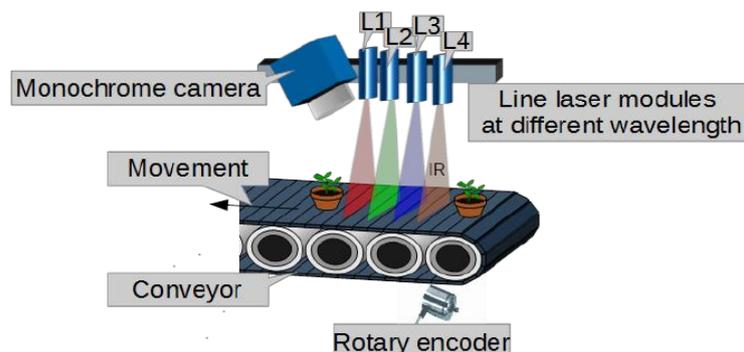


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des MWLP-Systems

Für den Einsatz mit dem MWLP-System können Linienlaser mit verschiedenen Wellenlängen im Bereich zwischen ca. 400 nm und ca. 1000 nm entsprechend den anwendungsspezifischen Anforderungen kombiniert werden. Das MWLP-System erkennt wäh-

rend des Scannens der Objekte alle Laserlinien und führt diese basierend auf Drehgeberinformationen und optischem Tracking auf Pixelebene zusammen. Einen genauen Überblick über das System gibt (STROTHMANN *et al.* 2014). Das MWLP-System kann sowohl in einer Konstellation mit festem Sensor und bewegten Objekten (z. B. montiert auf einem Förderband) oder in einer Konstellation mit bewegtem Sensor und festen Objekten (z. B. montiert auf einem Trägerfahrzeug o. ä.) betrieben werden.

Im Prinzip ist die Anzahl der Laser, die gleichzeitig am MWLP-System eingesetzt werden können, nicht beschränkt. Allerdings ist bei der Konfiguration zu beachten, dass jeder Laser im Bild eine bestimmte *Region-of-Interest* (ROI) des Blickfeldes der Kamera einnimmt. Um gültige Scans zu erzeugen, darf die jeweilige Laserlinie nur in dieser ROI erscheinen. Daher steht bei z. B. einer Konfiguration mit 3 Lasern pro Laser nur 1/3 des Sichtfeldes der Kamera zur Verfügung. Daher wird das für jede Triangulationsanwendung gültige Spannungsfeld zwischen erreichbarer Messauflösung und Größe des Messbereiches (maximaler messbarer Abstand – minimaler messbarer Abstand) hier mit zunehmender Laseranzahl verschärft, d. h. bei einer Konfiguration mit dem MWLP-System mit N Lasern muss entweder die erreichbare Distanzauflösung oder der Messbereich durch N geteilt werden. Daher ist ein Einsatz des MWLP-Systems mit 10 oder 20 Lasern eher unrealistisch, in Konfigurationen mit 3 - 4 anwendungsspezifisch wählbaren Lasern ließen sich jedoch in praktischen Experimenten gute Ergebnisse erzielen.

3 Bildvorverarbeitung

Die Bildverarbeitungsschritte des MWLP-Systems sind in (STROTHMANN *et al.* 2014) aufgeführt. In diesem Beitrag soll insbesondere erörtert werden, wie aus den originären Kamerabildern bildgebend auswertbare Reflexions- und Rückstreuungswerte extrahiert werden. Hierzu muss erwähnt werden, dass – nach ein paar Vorverarbeitungsschritten - ein optisches Matching nacheinander mit Versatz erfasster Kamerabilder durchgeführt wird.

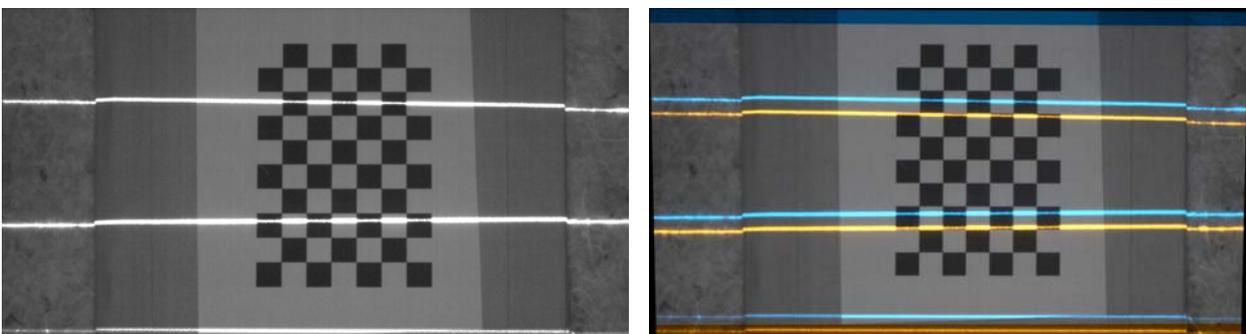


Abbildung 2: Optisches Bildmatching des MWLP-Systems. Links Original Kamerabild mehrerer Laserlinien, rechts Matchingergebnis von Bildern, die mit Versatz hintereinander aufgenommen worden sind.

Dies ist in **Abbildung 2** gezeigt. Auf der linken Seite der Abbildung ist ein Kamerarohbild mehrerer Laserlinien zu sehen. Auf der rechten Seite ist ein Bild zweier in etwas Abstand zueinander aufgenommener, gematchter Bilder zu sehen. Die Laserlinien werden vor dem Matchingprozess gefiltert, sodass das Matching nur auf Basis der Strukturen im Bildhintergrund stattfindet. Auf der rechten Seite sind 2 übereinander gelegte Bilder zu sehen, wobei ein Bild bläulich und eines orange eingefärbt ist. Überall, wo die Bilder identisch sind, entsteht auf diese Weise wieder ein graues Bild, Verzerrungen erscheinen farbig. In dem Bild ist zu sehen, dass der Hintergrund grau erscheint; die Bilder sind hier also identisch. Die Laserlinien erscheinen farbig, da diese mit dem Bildsensor verbunden sind und sich somit nicht mit dem Szenarie zusammen verschoben haben. Auf diese Weise lässt sich durch Differenzbildung gematchter Bilder ein erheblich verbessertes Eingangsbild für die Linienerkennung generieren, bei dem Laserlinien erheblich hervorgehoben werden und Hintergrundbeleuchtung bzw. Streulichteinflüsse von außen sich in den verschiedenen Bildern gegenseitig weg subtrahieren.

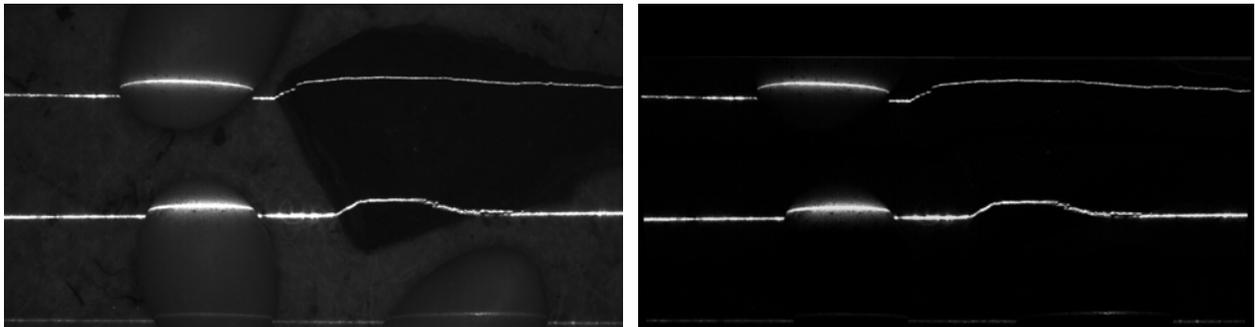


Abbildung 3: Kamerarohbild und Differenzbild einer Szene mit Kartoffel und Stein

Im linken Teil von **Abbildung 3** ist ein Kamerarohbild einer mit 3 Linienlasern gescannten Szenerie zu sehen. Im linken Teil der Szene befinden sich wasserreiche Objekte (Kartoffeln), im rechten Teil eine optisch dichtes Objekt (Stein). Im linken Teil von **Abbildung 3** ist das auf die beschriebene Weise mittels Matching und Differenzbildung generierte Differenzbild dieses Kamerarohbildes. Es wird zum Einen deutlich, dass die Laserlinien im Differenzbild deutlich hervorgehoben sind, was ideale Eingangsbedingungen für die Linienerkennung darstellt. Zum Anderen wird aber auch deutlich, dass die Rückstreuung der Laserlinien bei wasserreichen Objekten auf der linken Seite der Szene im Differenzbild besonders deutlich zu beobachten ist, da auch diese Effekte durch die Beleuchtungseinflüsse der fest zur Kamera montierten Laser induziert werden. Auf diese Weise bietet die Matchingbasierte Differenzbild-erstellung auch verbesserte Möglichkeiten zur streulichtunabhängigen Analyse der Laserrückstreuung bei verschiedenen Wellenlängen mit dem MWLP-System. Dies ist auch in **Abbildung 4** zu sehen.

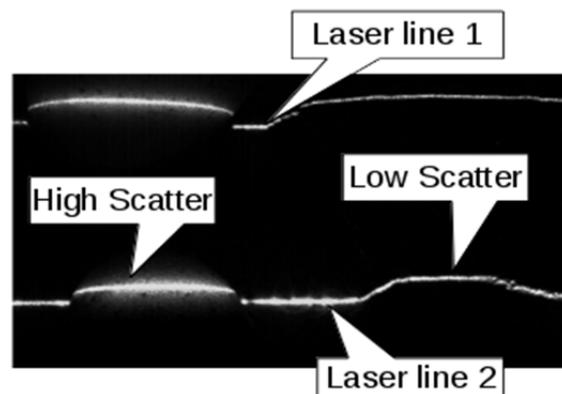


Abbildung 4: Differenzbildausschnitt mit starker Rückstreuung bei Kartoffel und wenig Rückstreuung bei Stein

4 Linienerkennung

Bei der Linienerkennung wird Bildspalte für Bildspalte in den Differenzbildern nach den jeweiligen Linien innerhalb ihrer zulässigen ROIs gesucht. Dieses Vorgehen ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. In **Abbildung 5** werden die Bilddaten aus **Abbildung 4** als Pseudofarbbild und als Höhenprofildarstellung gezeigt.

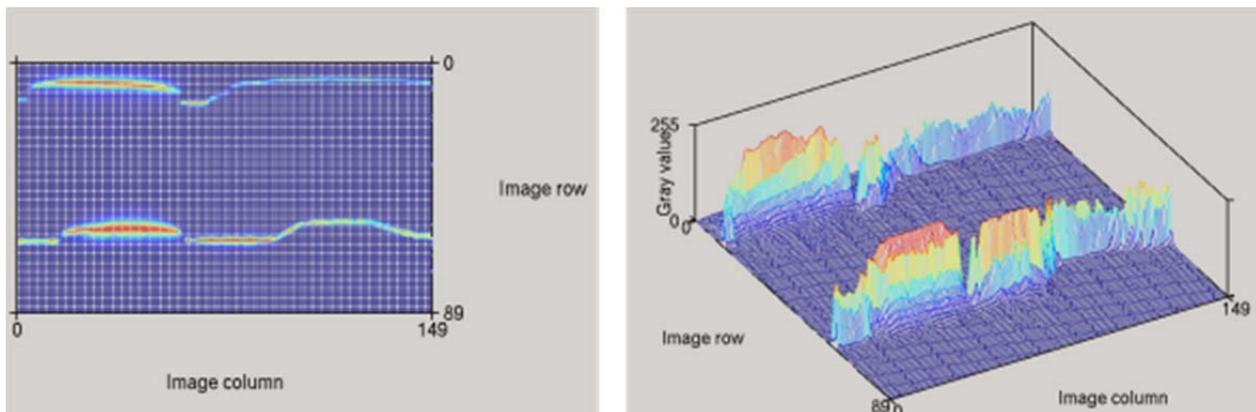


Abbildung 5: Pseudofarbbild und Höhenprofildarstellung der Bilddaten aus **Abbildung 4**. Die Grauwerte sind in z-Richtung aufgetragen. Die Bildauflösung ist zu Darstellungszwecken heruntergesetzt.

In **Abbildung 6** ist die Höhenprofildarstellung der Laserlinien in **Abbildung 4** gezeigt. Auch hier ist die Rückstreuung im vorderen Bereich zu erkennen, da die Linienprofile dort sanfter auslaufen, als im hinteren Bereich. Dies ist auch sehr deutlich anhand der in **Abbildung 7** gezeigten Querschnitte entlang der Bildspalten zu sehen. Hier ist die Bildzeile auf der x-Achse abgetragen, der y-Wert entspricht dem Grauwert im Differenzbild. Es wird deutlich, dass sich der vordere und hintere Querschnitt zwar in der Höhe der Peaks relativ wenig unterscheiden, wohl aber im Kurvenverlauf des aufgenommenen Querschnitts der Laserlinien.

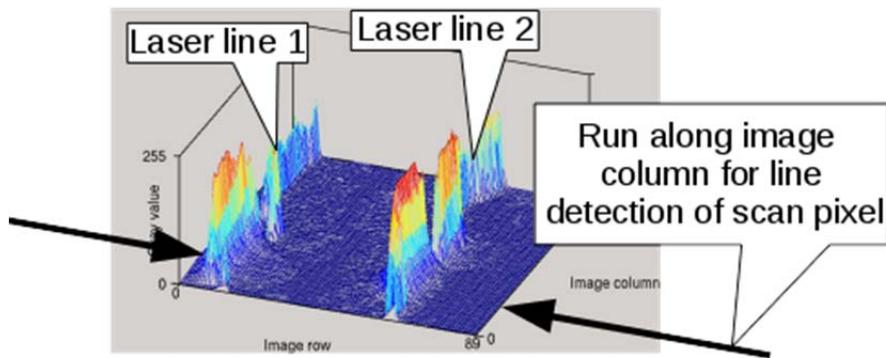


Abbildung 6: Laserlinie 1 und 2 aus **Abbildung 4** im Höhenprofil. Die Linienerkennung erfolgt entlang der Bildspalten.

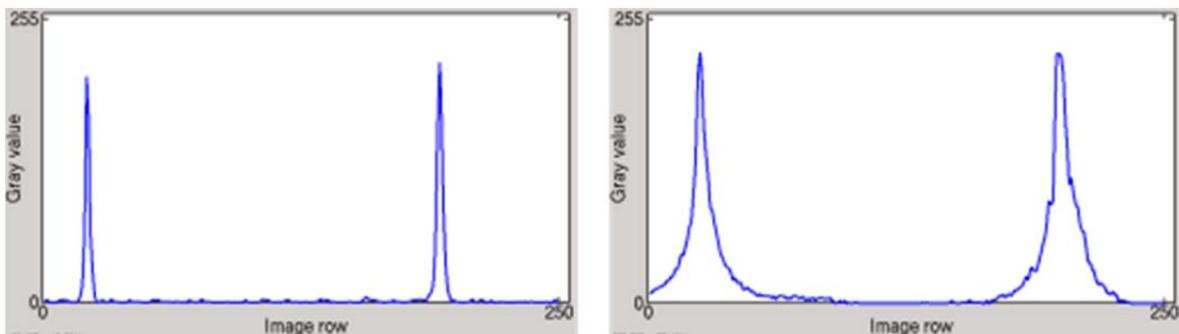


Abbildung 7: Querschnitt des Höhenprofils entlang einer Bildspalte. Links: hinterer Bereich, wenig Scattering; rechts: vorderer Bereich, viel Scattering

Derartige Querschnitte sind die Grundlage der Linienerkennung mit dem MWLP-System. Die Linien werden innerhalb vorab kalibrierter ROIs gesucht. Dabei werden die Liniensegmente mittels eines Schwellwerts ermittelt. MUELLER *et al.* haben gezeigt, dass eine solche Segmentierung als Vorschrift zur Linienerkennung üblichen mittels *Center-of-Gravity* (COG) Analyse die Linienerkennung beim Lichtschnitt insbesondere bei viel Scattering verbessert (MUELLER *et al.* 2014). Beim MWLP-System wird hier aus Performancegründen auf die COG-Analyse verzichtet und nur eine Segmentierung durchgeführt. Als Linienerkennung wird dabei Segmentmitte angenommen. Ob eine nachgeschaltete COG-Analyse die in (STROTHMANN *et al.* 2014) genannten Metriken des MWLP-System noch verbessern kann, ist zu prüfen. Es wird aber angenommen, dass diese Effekte marginal sind, da, wie auch in **Abbildung 7** zu sehen, die Querschnitte i.d.R. weitgehend symmetrisch sind.

5 Merkmalsextraktion für Reflexion und Rückstreuung

Um Reflexion und Rückstreuung für alle verbundenen Laser bildgebend erfassen zu können, müssen aus den Querschnitten der Laserlinie entlang der Bildspalten für jeden Pixel der entstehenden MWLP-Scandaten numerische Merkmale aus dem Linienquer-

schnitt extrahiert werden, die später skaliert und bildgebend dargestellt werden können. Hierbei ist allerdings die hohe Extraktionsrate zu beachten. Wenn das MWLP-System mit 100 fps Kameraframerate, 3 Linienlasern und voller Kameraauflösung von 2048 Bildspalten arbeitet, so finden pro Sekunde bis zu 614400 derartige Merkmalsextraktionsvorgänge statt (parallel zu Bildaufnahme/Kamera-/Lasersteuerung und allen sonstigen Bildverarbeitungsschritten). Auf Fitting eines Modelles zur Beschreibung von Laserrückstreuungsprofilen, wie bspw. die für die Analyse von Punktlasern verbreitete *Gaussian-Lorentzian Cross Product Function* (GL) (z. B. LORENTE *et al.* 2013), wurde hier verzichtet, da dies aufgrund der hohen Scanrate nicht machbar ist. Aufgrund der hohen Scanrate wurden hier einfachere, insbesondere Summenbasierte Merkmale ausgewählt, und zwar lediglich solche, die sich mit einem einzelnen Schleifendurchlauf über den Linienquerschnitt berechnen lassen. Dies schließt leider auch für die Linienbreite die Analyse nach *Full-Width-at-Half-Maximum* (FWHM) aus, da hier 2 Schleifendurchläufe erforderlich sind (Ein Durchlauf, um das Maximum zu finden und damit den Schwellwert festzulegen, und ein Durchlauf, um den Schwellwert anzuwenden und damit die Breite zu bestimmen.) Die Linienbreite (und Linienerkennung) finden hier mit einem festen Schwellwert statt. Aufgrund des hohen Normalisierungsgrades der Bilder, bedingt durch die Differenzbildung vor der Linienerkennung, welche Streulichteinflüsse sehr gut herausfiltert, konnten hier aber auch mit festem Schwellwert gute Ergebnisse erzielt werden.

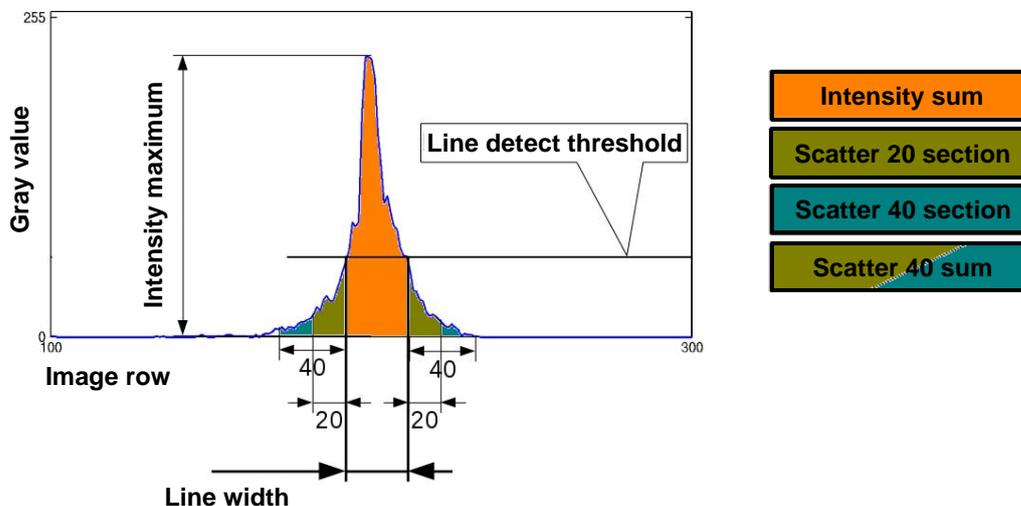


Abbildung 8: Extrahierte Reflexions- und Rückstreuungsmerkmale aus dem Linienquerschnitt pro Linienlaser und MWLP-Scanpixel.

Die Extraktion der Merkmale, die durch das System für jede Laserlinie und jede Bildspalte in jedem eingehenden Bild der Kamera ermittelt werden, sind in **Abbildung 8** dargestellt. Dort ist ein Querschnitt durch eine einzelne Laserlinie dargestellt (Ausschnitt aus einer Darstellung wie in **Abbildung 7** zu sehen).

Tabelle 1: Extrahierte Merkmale pro Linienlaser und MWLP-Scanpixel

Merkmal	Beschreibung
<i>Line-Width</i>	Abstand zwischen Linienanfang und -ende (Schnittstellen des Verlaufes der Grauwertkurve der Spalte des Differenzbildes mit dem Linienerkennungsschwellwert)
<i>Intensity-Maximum</i>	Maximaler Grauwert der Laserlinie im Differenzbild
Intensity-Sum	Summe der Pixelwerte der Spalte im Differenzbild zwischen Linienanfang und -ende
<i>Scatter-20-Section</i>	Summe der Pixelwerte der Spalte im Differenzbild im Abstand von 1 bis 20 Pixeln zum Linienanfang vor dem Linienanfang und im Abstand von 1 bis 20 Pixeln zum Linienende hinter dem Linienende
<i>Scatter-40-Section</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 21 bis 40 Pixel
<i>Scatter-40-Sum</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 1 bis 40 Pixel; entspricht <i>Scatter-20-Section</i> + <i>Scatter-40-Section</i>
<i>Scatter-60-Section</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 41 bis 60 Pixel
<i>Scatter-60-Sum</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 1 bis 60 Pixel; entspricht <i>Scatter-40-Sum</i> + <i>Scatter-60-Section</i>
<i>Scatter-80-Section</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 61 bis 80 Pixel
<i>Scatter-80-Sum</i>	Summe wie <i>Scatter-20-Section</i> mit Abstand 1 bis 80 Pixel; entspricht <i>Scatter-60-Sum</i> + <i>Scatter-80-Section</i>

Bei der Linienerkennung wird zunächst der Linienerkennungsschwellwert auf die Daten angewendet. Aus dieser Operation werden Linienanfang und Linienende ermittelt – als Linienposition wird dann wie oben erwähnt die Mitte der beiden Werte angenommen. Anschließend findet die Merkmalsextraktion statt. Die Beschreibungen der extrahierten Merkmale sind in **Tabelle 1** aufgeführt. Die Reflexionsintensität kann insbesondere durch die Merkmale *Line-Width*, *Intensity-Maximum* und vor allem *Intensity-Sum* beschrieben werden. Die *Scatter* Werte ergeben Anhaltspunkte für die Rückstreuung. Alle so beschriebenen Merkmale können mit einem einzelnen Schleifendurchlauf ermittelt werden. Ggf. könnte in der Nachverarbeitung aus diesen numerischen Merkmalen für besonders relevante Bereiche der Scandaten pixelweise ein GL-Fitting stattfinden, aber während des Scanvorganges, zu dem für jeden Pixel der Linienquerschnitt analysiert werden muss, ist so der Rechenaufwand reduziert.

6 Ergebnisse

Die Scandaten des MWLP-Systems können als kolorierte Punktwolken oder Abstandsbilder mit entsprechenden Overlay-Bildkanälen dargestellt werden. Die Darstellung ist konfigurierbar, die in **Tabelle 1** aufgeführten Merkmale können als Grauwerte oder HeatMaps skaliert werden oder als Overlays dargestellt werden, wobei entsprechend skalierte Werte verschiedener Merkmale in verschiedenen Farbkanälen übereinandergelegt

werden. In **Abbildung 9** sind beispielhafte Visualisierungen des Reflexionsmerkmals *Intensity-Sum* sowie der ermittelten Distanzinformationen gezeigt.

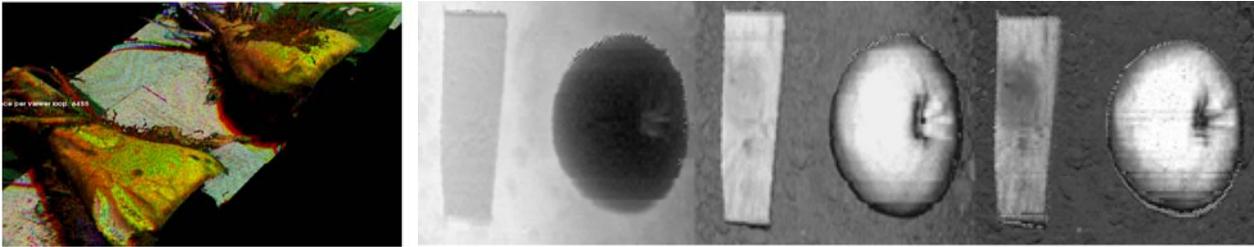


Abbildung 9: Beispielhafte Scandaten des MWLP-Systems. Links: Scan von Zuckerrüben als PointCloud. Der Scan erfolgte mit Lasern bei 405, 532 und 650 nm, die Farbkanäle enthalten skalierte *Intensity-Sum* Werte. Rechts: Scan von Apfel und Holzstück, grau-skalierte Tiefenkarte, grau-skalierte, bildgebende *Intensity-Sum* Werte für 850 nm und 650 nm Laser. (STROTHMANN *et al.* 2014).

Auch die Rückstreuungsmerkmale werden bildgebend erfasst und können entsprechend visualisiert werden. Dies ist in **Abbildung 10** zu sehen. Auf der linken Seite ist zu sehen, dass während des Scanvorganges der Laser bei 650 nm durch die Orange stark gestreut wird, weniger durch das Holz. Der Laser bei 532 nm wird in beiden Fällen nicht so stark gestreut. Dies ist in der rechten Hälfte der Abbildung als grau-skalierte Ansicht der MWLP-Scandaten zu sehen, wobei hier die *Scatter-80-Sum* Werte der beiden Laserlinien jeweils grau skaliert sind, wobei eine identische Skalierung genutzt wurde.

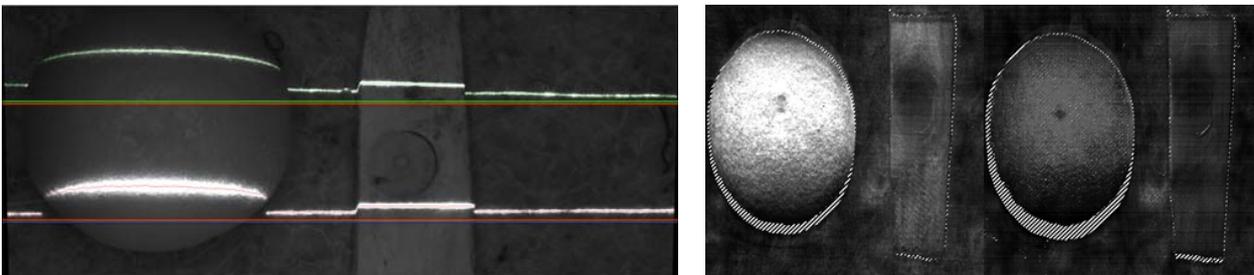


Abbildung 10: Rückstreuungserfassung und -visualisierung. Links: 2 Laserlinien @532 nm (oben) und @650 nm (unten) beim Scannen einer Orange und eines Holzstückes. Rechts: Grau-skalierte *Scatter-80-Sum* Werte des Scans der Szene für Laser @650 nm (linksseitig) und @532 nm (rechtsseitig) (STROTHMANN *et al.* 2014).

Es wird deutlich, dass sich die Unterschiede in der Stärke der Rückstreuung sowohl zwischen unterschiedlichen Wellenlängen als auch zwischen unterschiedlichen Objekten mit dem MWLP-System auch bildgebend beobachten lassen.

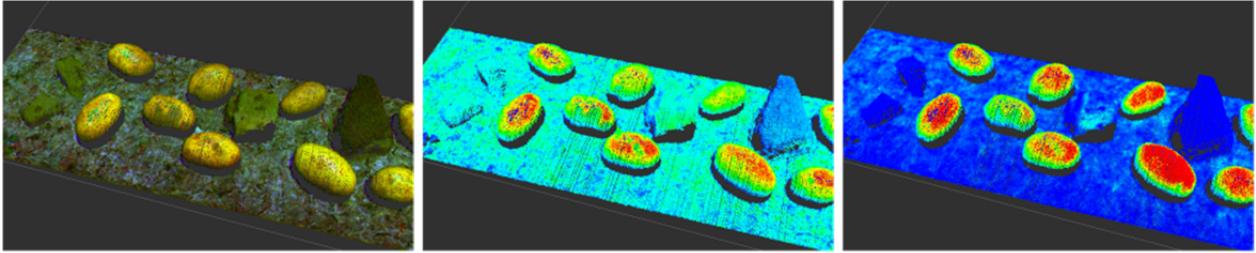


Abbildung 11: Scan von Kartoffeln und Steinen als PointCloud mit verschiedenen Farbvisualisierungen

Die Unterschiede in den Rückstreuungseigenschaften sind besonders geeignet, um wasserreiche Objekte von optisch dichten zu unterscheiden. Da Licht insbesondere im Wellenlängenbereich zwischen 600 und 1000 nm in wasserreiche Objekte eindringt (KRAEMMER *et al.* 1995) und die Laserlinien somit stark unter der Oberfläche zurückgestreut werden, unterscheiden sich die Rückstreuungswerte zwischen wasserreichen und optisch dichten Objekten hier besonders stark. Dies wird in **Abbildung 11** dargestellt. Hier sind MWLP-Scandaten von Kartoffeln (wasserreich) und Steinen (optisch dicht) als PointCloud dargestellt. Im linken Bild der Abbildung ist hierbei eine Farbvisualisierung mit den *Intensity-Sum* Werten der Laserlinien bei 405 nm, 532 nm und 650 nm in den entsprechenden Farbkanälen vorgenommen worden. Das mittlere Bild zeigt die gleichen Daten aus der gleichen Perspektive in einer anderen Visualisierung. Hierbei wurden die *Intensity-Sum* Werte des Lasers bei 650 nm als HeatMap skaliert, wobei Blau dem minimalen und Rot dem maximalen Wert entspricht. Das rechte Bild in **Abbildung 11** zeigt eine ebensolche Darstellung als HeatMap, wobei hier nicht die *Intensity-Sum* Werte skaliert wurden, sondern die *Scatter-20-Section* Werte als Rückstreuungsmerkmale. Es wird deutlich, dass insbesondere anhand der Rückstreuungswerte sich die Kartoffeln von den Steinen besonders deutlich unterscheiden.

7 Diskussion

Das MWLP-System bietet durch seine flexible Konfigurierbarkeit mit Lasern verschiedener Wellenlängen eine hervorragende Möglichkeit zur Erfassung präziser 3D-Informationen zusammen mit spektralselektiven Reflexions- und Rückstreuungsmerkmalen bei wählbaren Wellenlängen. Die erfassten Daten haben ein hohes Potential für Sensorikanwendungen, wobei es insbesondere in der Lage ist, Rückstreuungsmerkmale bei verschiedenen Wellenlängen nicht nur punktwise sondern bildgebend zu erfassen. Rückstreuungsmerkmale sind insbesondere im Bereich der Qualitätserfassung von Früchten von Interesse, wo (NOH & LU 2007) und (LORENTE *et al.* 2013) vielversprechende Ergebnisse mit punktförmiger Erfassung der Rückstreuung erzielt haben. Die Kombination mit der bildgebenden Rückstreuungserfassung des MWLP-Systems erscheint da eine interessante Möglichkeit zu sein.

Zur Präzision des MWLP-Systems erfolgte Auswertungen haben gezeigt, dass Abweichungen unter 1 mm bei der Distanzmessung und Linienzusammenführung erreicht werden (STROTHMANN *et al.* 2014.). Neben den gezeigten, mit dem MWLP-System auf einem Förderband erfassten Aufnahmen wurde in der vergangenen Saison auch der Einsatz auf einem Roboter zum Scannen von Pflanzen im Feld erfolgreich gezeigt. Erste Versuche zur Klassifikation von MWLP-Sensordaten sind werden zur Zeit durchgeführt. Dies verdeutlicht das hohe Potential des MWLP-Sensorsystems für verschiedenste Anwendungen.

Danksagung

Das MWLP-System wurde im Kontext der Projekte RemoteFarming.1 (gefördert durch BMEL/BLE) und SmartBot (gefördert durch EU Interreg EDR und Euregio) entwickelt.

Literaturverzeichnis

- BUSEMEYER L., MENTRUP D., MÖLLER K., WUNDER E., ALHEIT K., HAHN V., MAUERER H.-P., REIF J.C., WÜRSCHUM T., MÜLLER J., RAHE F., RUCKELSHAUSEN A. (2013):** Breed Vision – A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding: Sensors 2013(13): 2830-2847.
- KRAEMMER P., BARTELT H., FISCHER H., SCHMAUSS B. (1995):** Imaging in scattering media using phase modulated light sources. Proc. SPIE 2326: 65-74.
- LORENTE D., ZUDE M., REGEN C., PALOU L., GÓMEZ-SANCHIS J., BLASCO J. (2013):** Early decay detection in citrus fruit using laser-light backscattering imaging. Postharvest Biology and Technology (86): 424-430.
- MUELLER T., LANGMANN B., REITHMEIER E. (2014):** Development of a measurement system for the online inspection of microstructured surfaces in harsh industrial conditions. Proc. SPIE 91411F, doi:10.1117/12.2052080.
- NOH H.K., LU R. (2007):** Hyperspectral laser-induced fluorescence imaging for assessing apple fruit quality. Postharvest Biology and Technology 43(2): 193-201.
- PAULUS S., EICHERT T., GOLDBACH H.E., KUHLMANN H. (2014):** Limits of Active Laser Triangulation as an Instrument for High Precision Plant Imaging. Sensors 2014(14): 2489-2509.
- STROTHMANN W., RUCKELSHAUSEN A., HERTZBERG J. (2014):** Multiwavelength laser line profile sensing for agricultural crop characterization. Proc. SPIE 91411K, doi:10.1117/12.2052009.

Automatisierte Höhenbestimmung von Topfpflanzen mit dem OEOS-Lichtschattensensor am Beispiel von Weinreben

Automated height detection of pot plants with the OEOS shadow imaging sensor using grapevine

Dominik Nieberg¹, Kevin Bilges², Fritz Matthäus¹, Daniel Mentrup²,
Arno Ruckelshausen¹

¹ *University of Applied Sciences Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, Germany*

² *iotec GmbH, Albert-Einstein-Str. 1, 49076 Osnabrück, Germany*

Email: a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Der Einsatz von Lichtschattensensoren eröffnet durch die seitliche und verzerrungsfreie Bildaufnahme neue Optionen für die automatisierte Pflanzenphänotypisierung. Im Rahmen von Versuchsreihe am „*The Plant Accelerator*“ an der University of Adelaide wurde erstmals mit dem *Opto-Electronic Object-Scanner (OEOS)* der Firma *iotec GmbH* ein hochauflösender Laser-basierter Lichtschattensensor als bildgebendes System zur Phänotypisierung von Weinreben in Töpfen eingesetzt. Die verzerrungsfreien Binärbilder erlauben neue Möglichkeiten zur Erfassung morphologischer Pflanzenparameter. In dieser Arbeit wird exemplarisch ein schlanker Algorithmus vorgestellt, welcher den Wachstumsverlauf von Pflanzen basierend auf der Pflanzenhöhe sowie der Pixelbelegung errechnet.

Deskriptoren: Laserzeilensensor, Schattenbildverfahren, Pflanzenphänotypisierung, Höhenbestimmung, Wachstumsverlauf.

Abstract: *The application of shadow imaging sensors opens up new possibilities for automated plant phenotyping due to its sideview imaging free of optical distortions. With the Opto- Electronic Object Scanner (OEOS) of iotec GmbH a high-resolution laser line based shadow imaging sensor has been tested for the first time as an imaging system for phenotyping of grapevines along test series at “The Plant Accelerator” at the University of Adelaide, Australia. The binary images are free of optical distortions and allow the identification of new morphological plant traits. As a first example, a lean algorithm for the calculation of plant growth based on the plant height as well as on the pixel coverage is shown in this paper.*

Keywords: *shadow imaging, laser line sensor, light curtain, plant phenotyping, plant height detection, plant growth rate.*

1 Einleitung

Nach der technologischen Revolution in der Genforschung wurde bald deutlich, dass deren Potential in der Pflanzenzucht ohne entsprechende Phänotypisierungstechnologien in der Pflanzenzüchtung nur bedingt ausgeschöpft werden konnte (FURBANK & TESTER 2011, MONTES *et al.* 2007). In der vergangenen Dekade wurde daher die Forschung im Bereich der automatisierten Pflanzenphänotypisierung stark intensiviert. Die Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Genotyp und dem Phänotyp einer Pflanze hat im Bereich der Einzelpflanzenforschung in vollautomatisierten Gewächshausanlagen in den vergangenen Jahre große Fortschritte gemacht. Kontrollierte Laborbedingungen erlauben den Einsatz zahlreicher bildgebender Sensorsysteme und darauf basierender Untersuchungen (LI *et al.* 2014). Auch in parzellenbasierten Feldversuchen konnten automatisierte Hochdurchsatzverfahren der Pflanzenphänotypisierung erfolgreich eingesetzt werden (BUSEMEYER *et al.* 2013, MONTES *et al.* 2011, RUCKELSHAUSEN 2014, WINTERHALTER *et al.* 2013).

Dennoch unterscheiden sich beide Ansätze deutlich, auch in Hinblick auf die zu untersuchenden Merkmale. Zwei grundlegende gemeinsame Merkmale in beiden Verfahren sind die Pflanzenhöhe und der Wachstumsverlauf. In vollautomatisierten Gewächshäusern wird hierfür zum Beispiel ein LemnaTec *Scanalyzer 3D-HT* eingesetzt (HONSDORF *et al.* 2014). In den Feldversuchen mit Mais und Getreide hat sich der Einsatz von Lichtgittertechnologien als bildgebende Sensorsysteme bewährt (BUSEMEYER *et al.* 2013, DZINAJ *et al.* 1998, FENDER *et al.* 2005, KIELHORN *et al.* 2000, MONTES *et al.* 2011).

Bei den verschiedenen Lichtgittertechnologien werden typischerweise LEDs als Sender und Fotodioden als Empfänger eingesetzt, welche übereinander angeordnet sind und seriell ausgelesen werden. In 2014 stellte die Firma *iotec GmbH* erstmals den *Opto-Electronic-Object-Scanner (OEOS)* vor (KOVACHEVA *et al.* 2014). Das OEOS-System geht vom bislang in der Pflanzenphänotypisierung eingesetzten Funktionsprinzip einzelner in Reihe angeordneter Lichtschranken zu einer einzigen Lichtquelle über, welche über einen Spiegel als paralleles Licht auf eine CCD/CMOS-Sensorzeile projiziert wird. Mit einer vertikalen Auflösung von 64 µm und einer Auslesegeschwindigkeit von 4000Hz eröffnet das OEOS-System neue Dimensionen zur Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmale. In Kooperation mit der *Australian Plant Phenomics Facility - APPF* (www.plantphenomics.org.au) konnte ein OEOS-Prototyp im *The Plant Accelerator* erstmals für phänotypische Untersuchungen eingesetzt werden. *The Plant Accelerator* ist eine vollautomatisierte Versuchsanlage für Hochdurchsatzverfahren unter kontrollierten Bedingungen. Für die phänotypische Analyse nutzt *The Plant Accelerator* den LemnaTec *Scanalyzer 3D-HT*.

Es war das Ziel der Untersuchungen mit dem OEOS, das Potential des Sensors in Hinblick auf die hohe Auflösung unter kontrollierten Laborbedingungen zu testen. Hierfür wurden im Rahmen mehrerer Versuchsreihen am *The Plant Accelerator* Daten erhoben. Beispielhaft für die schlanke Bildverarbeitung aufgrund der verzerrungsfreien

Binärdaten wurde ein Wachstumsverlauf der Pflanzen auf Basis der Pflanzenhöhe sowie der Pixelbelegung erstellt. Die Pflanzenhöhe ist in der Pflanzenzucht nicht eindeutig bestimmt und muss je nach Erkenntnisinteresse definiert werden. Da die erhobenen Daten bislang nicht in die phänotypischen Untersuchungen des APPF einfließen, wurde versuchsreihenübergreifend die Pflanzenhöhe als höchster Pixel der zusammenhängenden Bildfläche im Schattenbild definiert.

Die Errechnung des Wachstumsverlaufs anhand der Pixelbelegung im Schattenbild wurde mit Lichtgittertechnologien bereits erfolgreich im Feldversuchswesen durchgeführt (BUSEMEYER *et al.* 2013, FENDER *et al.* 2006). Auch der *Scanalyzer 3D-HT* im *The Plant Accelerator* erfasst den Wachstumsverlauf anhand der Pixelbelegung (HONSDORF *et al.* 2014) auf Grundlage von RGB-Bildern aus mehreren Perspektiven. In Laborversuchen wurde bereits gezeigt, dass dieser Ansatz auch mit Lichtgittertechnologien durchgeführt werden kann (FANOURAKIS *et al.* 2014).

Anhand der Messungen aus der Versuchsreihe mit 28 Einzelpflanzen der Weinrebsorte (*Vitis vinifera*) Shiraz konnte mit beiden Ansätzen erfolgreich ein Wachstumsverlauf erstellt werden. Im Rahmen dieses Papiers wird der Algorithmus erläutert werden, welcher hierfür erstellt wurde. Eine Überprüfung der Wachstumsverläufe mit den Ergebnissen des Referenzsystem *Scanalyzer 3D-HT* ist der nächste Schritt über diese Arbeit hinaus.

2 Material und Methoden

Das *OEOS 800* der Firma *iotec GmbH* wurde zur Aufnahme von Weinpflanzen bei der APPF in Adelaide, Australien eingesetzt. Dabei wurde es in einem Gewächshaus an einer integrierten Förderanlage (*LemnaTec*) in Kombination mit weiteren Systemkomponenten angebracht.

2.1 The Plant Accelerator

The Plant Accelerator (**Abbildung 1**) ist eine Einrichtung der APPF in Adelaide, Australien welche sich auf dem Waite Campus der University of Adelaide befindet. Die Einrichtung verfügt über zwei *Scanalyzer 3D-HT* der Firma *LemnaTec* und wurde im Januar 2010 offiziell eröffnet. Der *Scanalyzer 3D-HT* (<http://www.lemnatec.com/products/hardware-solutions/scanalyzer-3d-high-throughput/>) ist ein vollautomatisierte Versuchsanlageanlage für Hochdurchsatzverfahren unter kontrollierten Bedingungen, welche mit seinen fünf verschiedenen *Scanning modes* (*infrarot Licht, sichtbares Licht, nahinfrarot Licht für Wurzeln, nahinfrarot Licht, fluoreszenz Licht*) und der entsprechenden Software, Pflanzendaten liefern kann.

Die beiden Anlagen sind im Obergeschoss des *The Plant Accelerator* untergebracht. Die Anlagen befinden sich im vorderen weißen Bereich sowie im hinteren braunen Bereich auf **Abbildung 1**.

Am *The Plant Accelerator* werden unterschiedliche Testreihen vermessen. Während der Testphase des *OEOS*-Systems konnten so Aufnahmen von verschiedenen Testreihen mit unterschiedlichen Pflanzentypen gemacht werden.



Abbildung 1: *The Plant Accelerator* der *APPF* in Adelaide, Australien

2.2 OEOS 800 System

Das *OEOS* System besteht aus einem Sender, welcher parallelisierte Laserstrahlen aussendet, sowie einem Empfänger, welcher die Laserstrahlen detektiert. Wenn sich ein Objekt zwischen Sender und Empfänger befindet werden die Laserstrahlen an dieser Stelle unterbrochen. So ergibt sich bei einer kontinuierlichen Objektgeschwindigkeit (z.B. durch ein Förderband) eine fortlaufende Aufnahme des Objektes wie in **Abbildung 2** dargestellt.

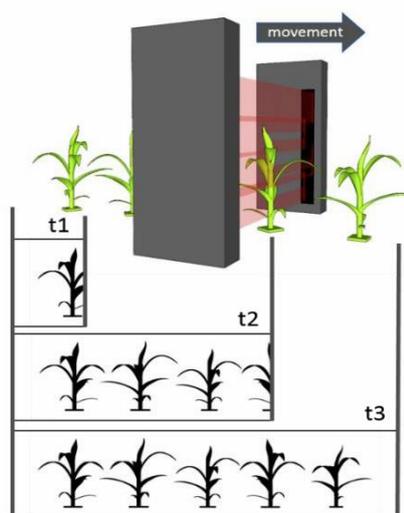


Abbildung 2: Funktionsprinzip des *OEOS* Sensors

Die Auflösung von 64 μm entspricht einem Pixel in vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung ist die Auflösung von der Objektgeschwindigkeit sowie der Abtastrate des Sensors (max. 4000 Hz) abhängig. Die Bildgröße sowie die vertikale Auflösung können somit angepasst werden. Jede der aufgenommenen Zeilen wird zur Laufzeit mit einem Zeitstempel versehen und in eine Log-Datei geschrieben, welche am Ende der Messung abgespeichert wird.

Die erzeugten Bilder aus den Messungen weisen für jeden Pixel einen direkten Zusammenhang zwischen der Höhe sowie der Breite in Metern auf. Dadurch ist es möglich das Pflanzenwachstum anhand der Pflanzenhöhe sowie der Pflanzenfläche aus den Messdaten zu bewerten.

2.3 OEOS 800 System Integration am The Plant Accelerator

Das *OEOS 800* kann in Kombination mit verschiedensten Sensoren als eigenständige Messstation aufgebaut werden, wie in **Abbildung 3** schematisch dargestellt. Für die Versuche am *The Plant Accelerator* wurde das *OEOS System* mit einem Start/Stop-Trigger sowie zwei RGB- Kameras zur Bildkontrolle der aufgenommenen Daten kombiniert. Die Daten und Bilder werden mit Datum- und Zeitstempel abgelegt.

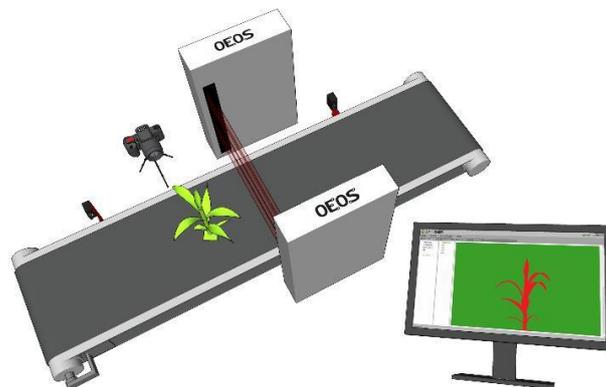


Abbildung 3: Schematische Darstellung der *OEOS 800* Messstation

Fährt ein Objekt an dem Start-Trigger vorbei, wird eine Messung gestartet. Die Messung läuft solange, bis das Objekt an dem Stop-Trigger vorbei fährt. Für die Kameras kann zusätzlich ein zeitgesteuerter Selbstauslöser mit der Messung gestartet werden. Dadurch ist es möglich eine voll automatisierte Messung durchzuführen.

Die *OEOS* Messstation wurde, wie in **Abbildung 4** dargestellt, im *LemnaTec – Scanalyzer 3D-HT* der *APPF* zwischen den Bildaufnahmekabinen und der Wässerungsstation installiert. Die Messstation nutzt das bestehende Transfersystem und muss nicht weiter in die Sensorik oder die Software des *Scanalyzer 3D-HT* integriert werden.

Die Pflanzenversuchsreihen werden in entsprechend Töpfe gepflanzt. Die Töpfe werden auf dem Transfersystem mit entsprechenden RFID-Bestückten Werkstückträger befördert, in einem Lager gelagert und den Messstationen einzeln zugeführt. In den Bildaufnahmekabinen werden die Töpfe durch pneumatisch betätigte Stopper angehalten und die Aufnahmen vorgenommen. Das Transfersystem läuft kontinuierlich weiter und Messungen mit dem *OEOS* – *Sensor* sind ohne Verzögerung möglich.

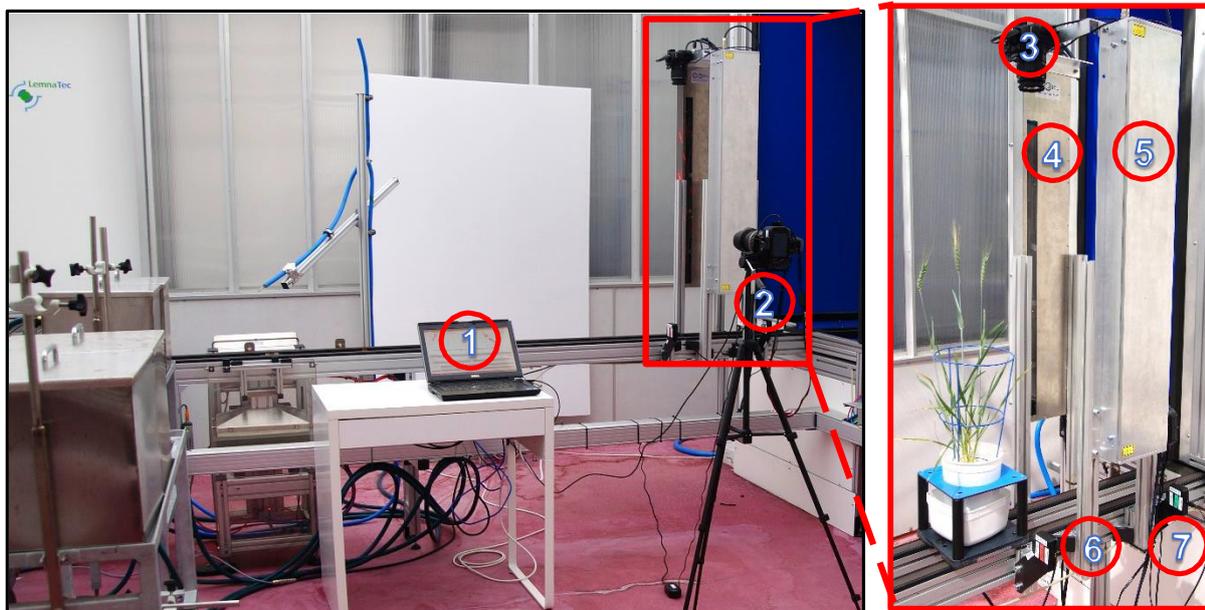


Abbildung 4: Einbauort der *OEOS*-Messstation am *Scanalyzer 3D-HT* - (links) **1:** Laptop zur Datenaufnahme; **2:** Kamera Seite; (rechts) **3:** Kamera oben; **4:** *OEOS*-Empfänger; **5:** *OEOS*-Sender; **6:** Start-trigger; **7:** Stopp-trigger

2.4 Messreihe

Während der Einsatzzeit des *OEOS*-Systems am *The Plant Accelerator* wurden Daten in mehreren Versuchsreihen (Gerste, Weinreben, Sonnenblumen, Mais) aufgenommen. Für diese Arbeit wurde die Versuchsreihe der Weinrebsorte (*Vitis vinifera*) Shiraz herangezogen. Die Messreihe besteht aus insgesamt 28 Pflanzen. Die Pflanzen befanden sich im Stadium von 22 Tage (typische Pflanzengröße ca. 20 cm) bis 41 Tage (typische Pflanzengröße ca. 70 cm) nach der Pflanzung und wurden täglich vermessen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Bilder bei einer Systemhöhe von 810 mm, einer Abtastrate von 2330 Hz sowie einem Aufzeichnungszeitraum von 3 Sekunden aufgenommen. Anhand dieser Konfiguration entstanden Binärbilder der Pflanzen mit einer Auflösung von rund 88 Mega-Pixel (6.990x12.656) aufgezeichnet.

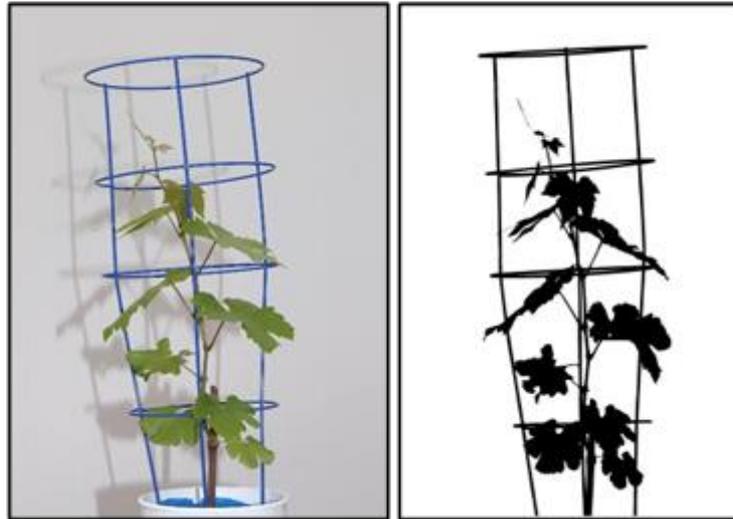


Abbildung 5: (links) OEOS-Kontrollbild von Pot 13 - Lane 1; (rechts) dazugehöriges Schattenbild des OEOS-Systems

Es wird ein Drahtgestell wie in **Abbildung 5** in die Töpfe eingelassen damit unter anderem ein gerades Hochranken der Pflanzen zustande kommen kann. Der Drahtkorb besteht bei dieser Messreihe aus drei senkrechten Streben, so wie vier waagrecht in einem bestimmten Abstand übereinander angeordneter Ringen. Für die Höhenbestimmung mittels OEOS – Systems muss der Drahtkorb entsprechend beachtet werden, wie in Kapitel 2.5 dargelegt wird. In **Abbildung 5** ist eine Aufnahme des OEOS-Systems sowie das dazugehörige Kontrollbild der seitlichen RGB-Kamera der Pflanze 13 aus der Versuchsreihe 1 zu sehen. Im Vergleich der beiden Bilder wird die Verzerrung der Pflanze im Kontrollbild durch die Kameralinse deutlich erkennbar, insbesondere bei den Ringen des Drahtkorbes.

2.5 Algorithmus

Ziel des Algorithmus ist die Berechnung der Pflanzenhöhe sowie deren Flächenbelegung in Pixeln. Die Pflanzenhöhe wurde als höchster Punkt der zusammenhängenden Pixelfläche definiert. Hierbei erweist sich der beschriebene Drahtkorb als Störgröße. Wenn die Pflanze über dem Korb endet, kann angenommen werden, dass das oberste der gesamten zusammenhängenden Pixel die Höhe der Pflanze angibt. Um zu wissen ob der oberste Teil der Pflanze in dem Bereich des Drahtkorbs endet, muss der oberste Ring des Drahtkorbes ermittelt werden.

Der Ablauf des Algorithmus (**Abbildung 6**) fängt mit der Konvertierung des OEOS-Bildes mit einer Auflösung von rund 90 Mega-Pixel in eine Funktion an. Die Funktion enthält die Summen aller schwarzen Pixel für die jeweilige Bildzeile. Diese Summe ist die Grundlage zur Berechnung des Flächenwachstumsverlaufs der Pflanzen. Das Drahtgeflecht wird hierbei mitgezählt und kann anschließend als Offset bei der Auswertung herausgerechnet werden.

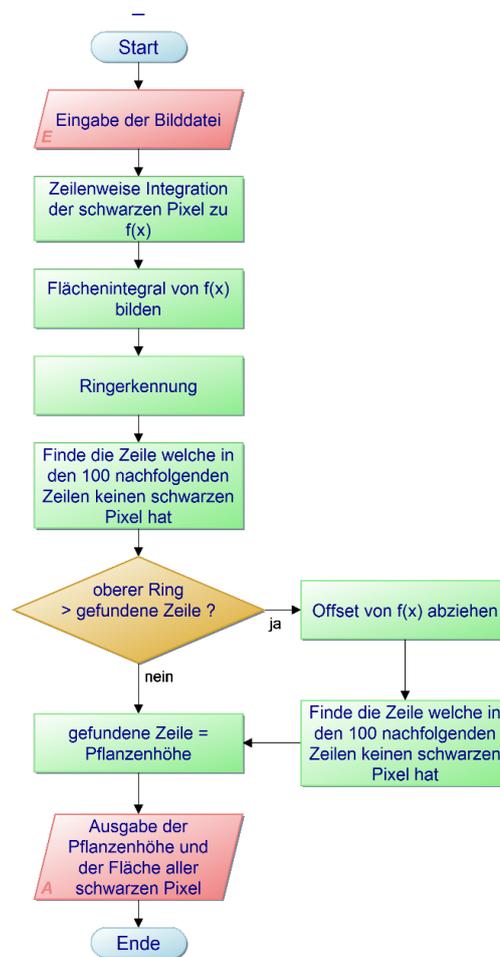


Abbildung 6: Ablaufdiagramm der Höhenbestimmung

Für die Höhenbestimmung der Pflanze müssen die Ringe des Korbgeflechts identifiziert werden. Da sich die Ringe in der erstellten Funktion durch eine starke Steigung von der Pflanze abheben, sind diese über die Ableitung, wie in **Abbildung 7** dargestellt, näher zu untersuchen. Die erste Ableitung der Funktion zeigt durch eine Ansammlung hoher Steigung in den Bereichen der Ringe die Möglichkeit zur Verbesserung der Erkennung durch eine bereichsweise Integration der absoluten Werte der Ableitung. Dies hat zur Folge, dass die Ansammlungen der Steigungen an den Ringbereichen stärker von den sanften Steigungen der Pflanze abgehoben werden.

Zur Bestimmung der Ringpositionen wird das Resultat der Integration mit einem dynamischen Schwellwert verglichen. Der Schwellwert läuft vom Maximum des Resultates nach unten, bis die Anzahl der Ringe durch die Ringerkennung über dem Sollwert, hier vier Ringe, liegt. Wenn das der Fall ist, wird die Schwelle auf den letzten gültigen Wert (richtigen Anzahl an Ringen) zurückgesetzt und die Positionen der oberen Kanten der Ringe ermittelt.

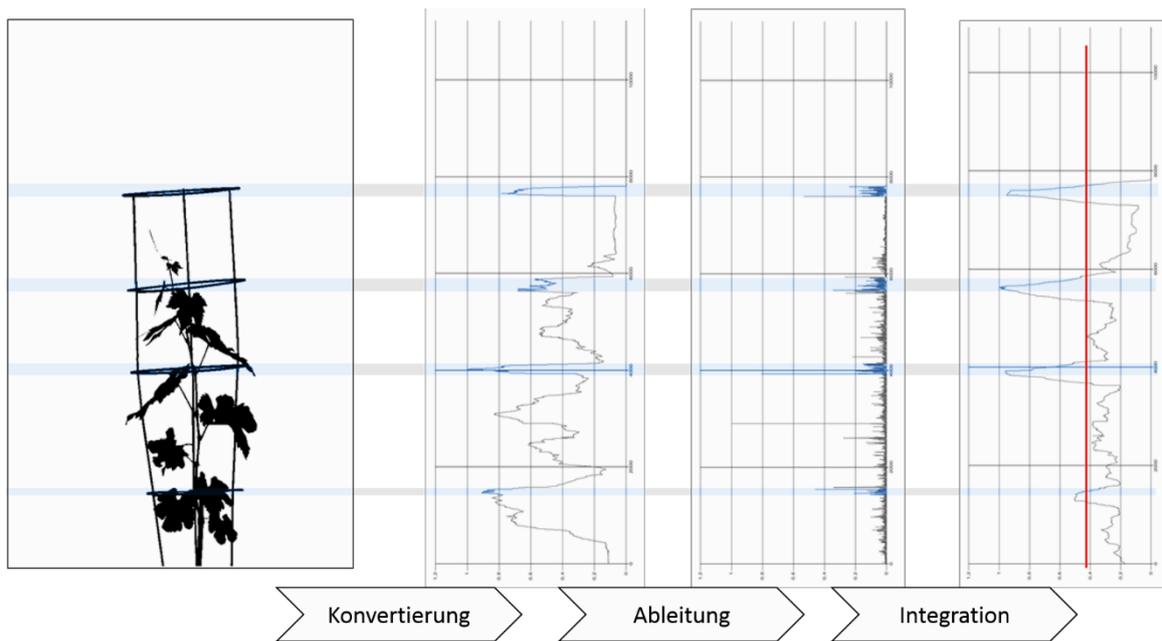


Abbildung 7: Vorgehensweise der Ringerkennung – 1: Binärbild des OEOS-Systems; 2: Funktion der Summen aller schwarzen Pixel für die jeweilige Bildzeile; 3: Ableitung der Funktion; 4: Integration der absoluten Werte der Ableitung

Mit dem Wissen der Ringpositionen kann darauf geschlossen werden, ob die Pflanze oberhalb des obersten Ringes endet. Dazu wird die aus den Bildzeilen erstellte Funktion von der Bodenseite aus auf leere Zeilen geprüft. Wenn genügend aufeinanderfolgende Zeilen als leer erkannt wurden, ist die Höhe des vermessenen Objektes erkannt. Ist diese niedriger als der oberste Ring, so befindet sich das Pflanzenende innerhalb des Drahtkorbes. Andernfalls wäre die Pflanzenhöhe somit bestimmt.

Wenn das Pflanzenende in dem Drahtkorb zu suchen ist, müssen die senkrechten Streben behandelt werden. Dazu wird ein Offset auf die Funktion der Bildzeilen angewendet, welcher der Dicke der drei Streben entspricht. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde dieser Offset bei der definierten horizontalen Auflösung von 6.990 Pixel mit 150 Pixeln definiert. Wenn der Offset vor der Ringerkennung angewendet wird kann es passieren, dass die Pflanze oberhalb des Drahtkorbes abgeschnitten wird, wodurch die Höhe nicht richtig ermittelt werden kann. In **Abbildung 8** ist das Ergebnis der Höhenbestimmung dargestellt.

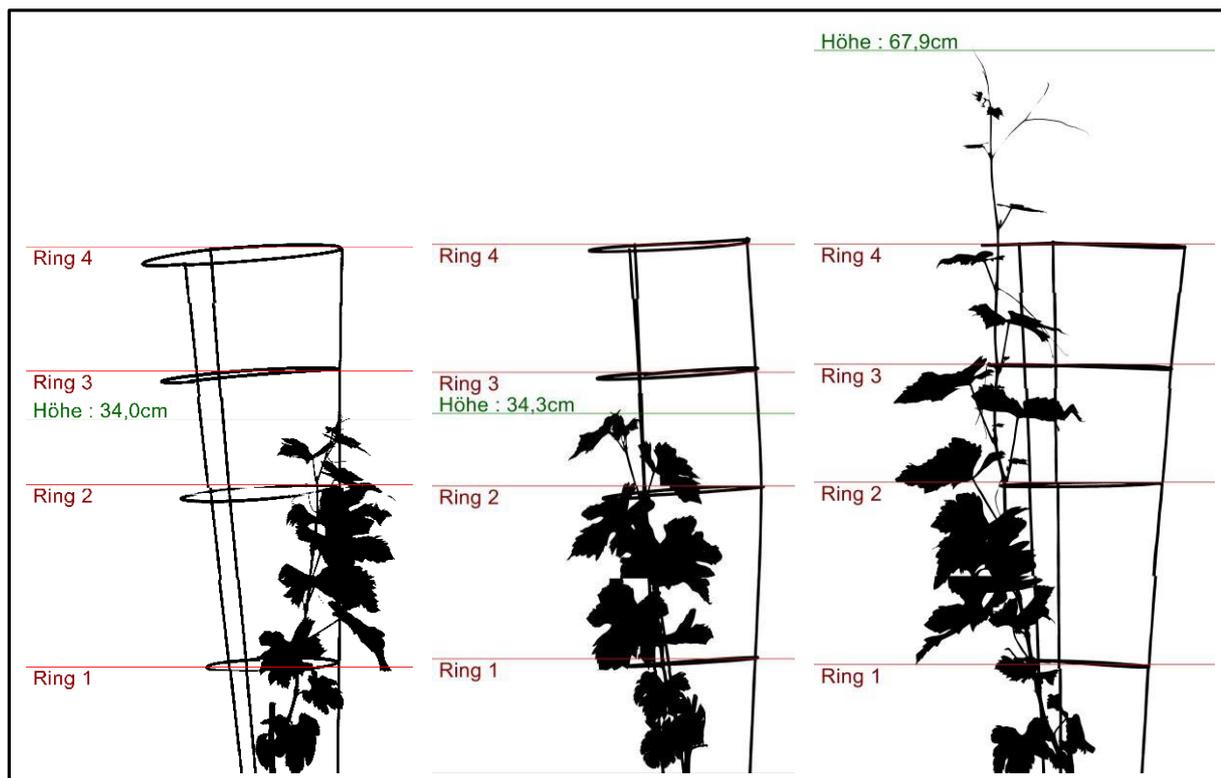


Abbildung 8: Ergebnis der Höhenbestimmung bei Pot 14 (links) und Pot 11 (mitte und rechts) an zwei verschiedenen Tagen der Linie 1 mit erkannten Ringen und der Pflanzenhöhe

3 Ergebnisse

Für die Auswertung standen 13 Messtermine im Zeitraum zwischen dem 25.10.2014 und dem 13.11.2014 zur Verfügung. Beispielhaft sind in **Abbildung 9** die Höhenwachstumsverläufe von drei verschiedenen Pflanzen über den Messzeitraum dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für diesen Zeitraum einen weitgehend linearen Wachstumsverlauf. Bestehende Abweichungen können von unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten, unterschiedlichen Tageszeiten oder anderen Einflüssen stammen. Die Versuche mit dem *OEOS*-System haben gezeigt, dass ein Höhenwachstumsverlauf mit dem dargestellten Algorithmus erstellt werden kann. Die Aussagekraft dieses Wachstumsverlaufs für phänotypische Untersuchungen muss noch geklärt werden. Hierfür bietet sich ein Vergleich der *OEOS*-Daten mit den Ergebnisse des *Scanner 3D-HT* für diese Versuchsreihe an.

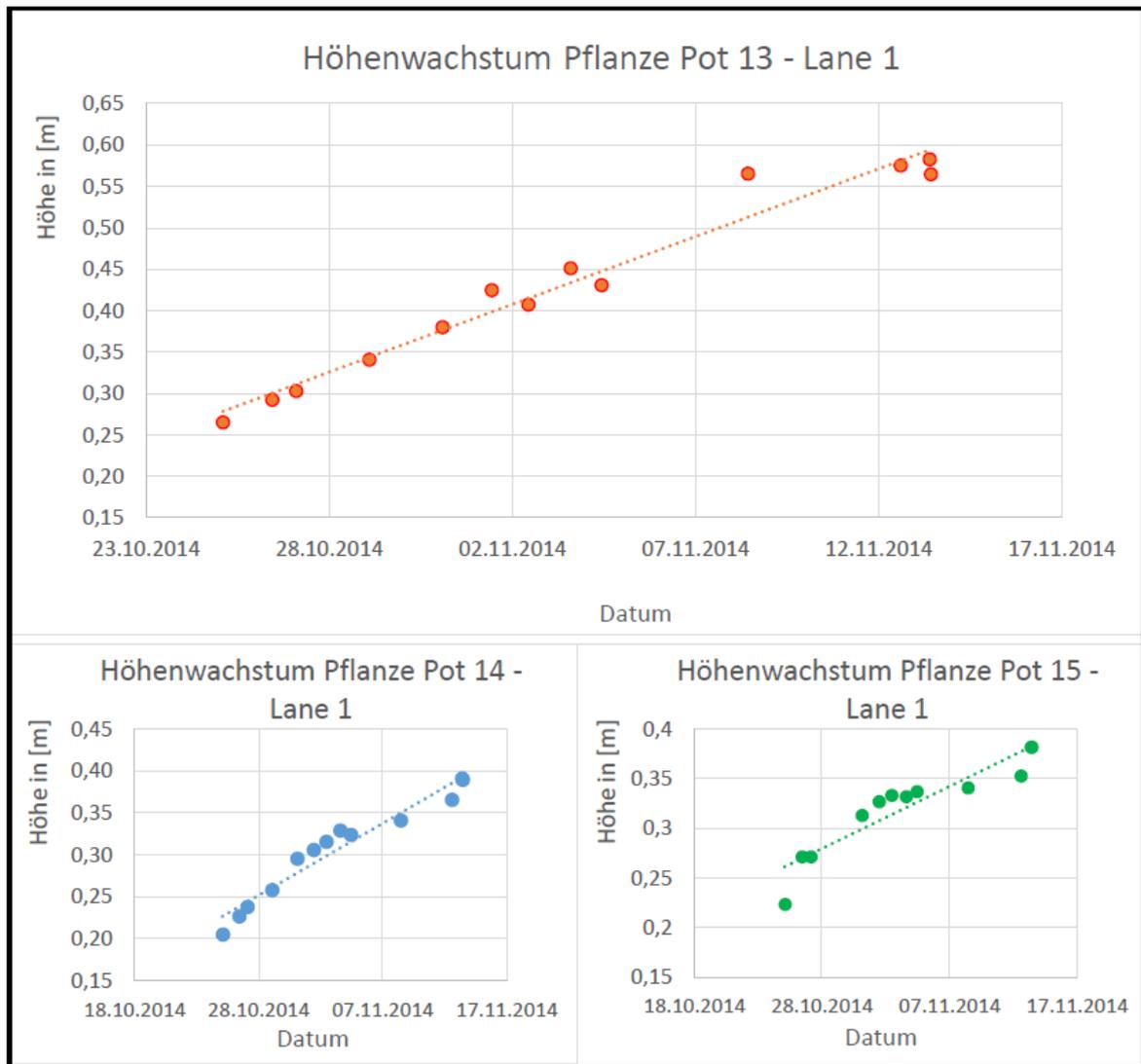


Abbildung 9: Beispiel Höhenwachstumsverläufe von Pot 13 bis Pot 15 der Reihe 1 welche aus der ermittelten Pflanzenhöhe resultieren

Am Beispiel der Pflanzen 13-15 der Versuchsreihe werden in **Abbildung 10** ebenfalls exemplarisch die Wachstumsverläufe der Pflanzen auf Basis der Pixelbelegung dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Auflösung des *OEOS*-Systems bei einer Pixelbelegung durch die Pflanze bis zu 7 Mega-Pixeln. Allerdings ist erkennbar, dass sich der Flächenwachstumsverlauf vom Höhenwachstumsverlauf unterscheidet. Zudem ist die Streuung der Messergebnisse deutlich größer. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass der zweidimensionale Ansatz des Schattenbildverfahrens zur Bestimmung von Flächenwachstum bei Einzelpflanzenuntersuchungen nicht die ausreichend ist. Für eine endgültige Aussage müssen die Wachstumsverläufe ebenfalls mit den Ergebnissen des *Scanalyzer 3D-HT* verglichen werden.

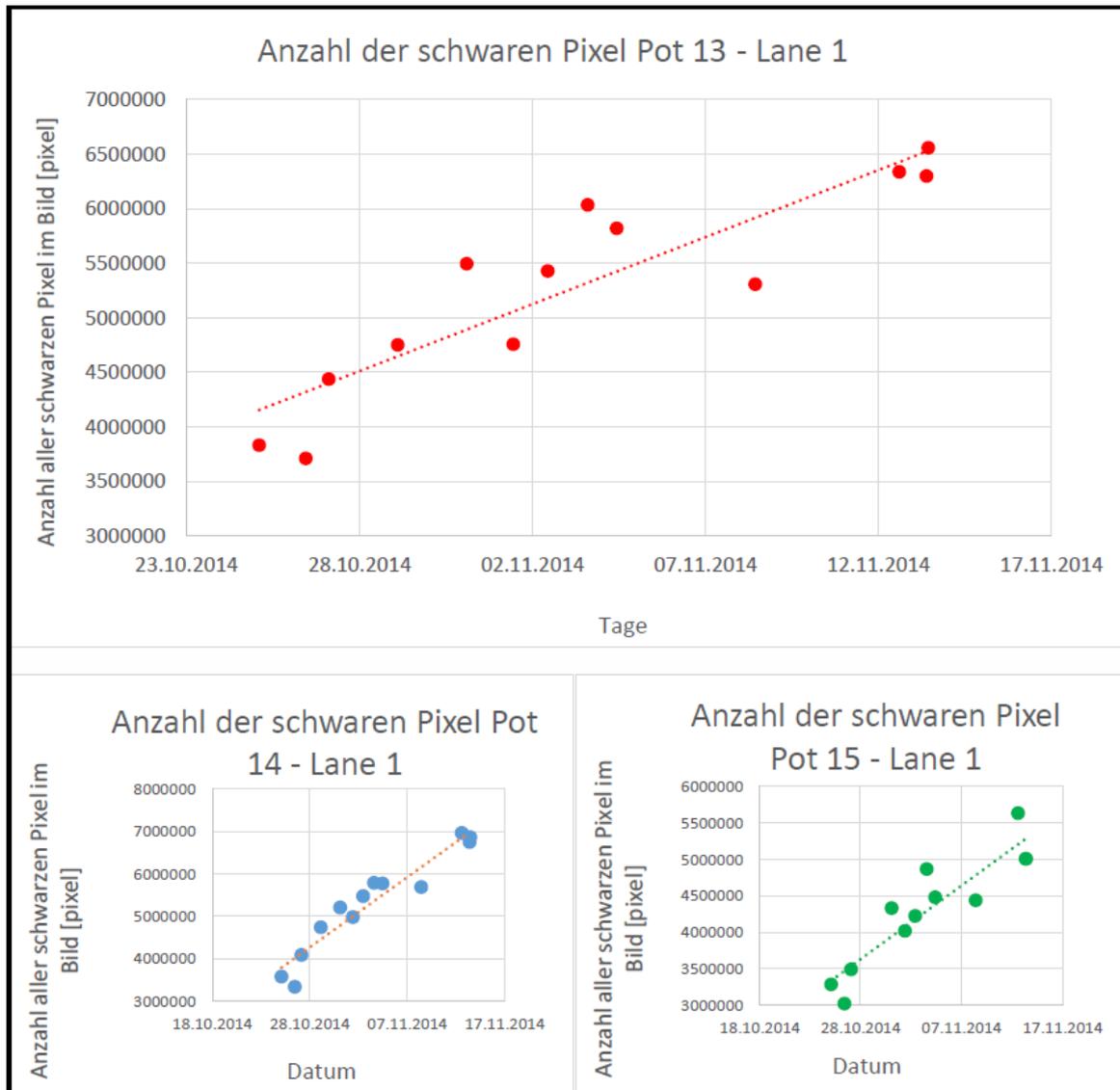


Abbildung 10: Beispiel der Flächenwachstumsverläufe von Pot 13 bis Pot 15 der Reihe 1, welche über die Anzahl der belegten Pixel in einem Bild ermittelt wurden

4 Fazit

Die Funktionalität des *OEOS*-Systems konnte erfolgreich getestet werden. Es wurde gezeigt, dass das *OEOS*-System in *Scanalyzer 3D-HT*-Phänotypisierungsanlagen integriert werden kann und vollautomatisiert hochauflösende Schattenbilder liefert. Die Berechnung phänotypischer Merkmale wurde am Beispiel des Höhenwachstumsverlaufs und des Flächenwachstumsverlaufs bei Weinreben demonstriert. Durch die binäre Datenstruktur und die verzerrungsfreien Aufnahmen konnten diese Merkmale mit einem schlanken Algorithmus errechnet werden. Die Aussagekraft der errechneten Wachstumsverläufe für phänotypische Analysen muss in einem nächsten Schritt durch einen Abgleich der Ergebnisse mit den Resultaten des *Scanalyzer-3D-HT* als Referenzsystem überprüft werden. Die errechneten Flächenwachstumsverläufe legen den Schluss nahe, dass eine ausschließlich zweidimensionale Aufnahme mit dem

OEOS-System nicht ausreichend sein kann. Hier erscheint es sinnvoll, weitere Versuche durchzuführen und Schattenbilder einer Pflanze aus mehreren Perspektiven für die Berechnung des Flächenwachstumsverlaufs heranzuziehen.

Die in dieser Versuchsreihe verwendete Auflösung von rund 88 Mega-Pixeln könnte in der Horizontale durch eine höhere Abtastrate und eine geringere Objektgeschwindigkeit noch deutlich erhöht werden. Die Autoren sind überzeugt, dass das OEOS-System noch viel Potential für die Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmale bietet, wie z.B. die Vermessung der Pflanzenstengel. Dafür ist die verstärkte Zusammenarbeit mit Biologen und Saatgutzüchtern eine wichtige Voraussetzung.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "predbreed" vom Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert. Ohne die freundliche Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung des APFF und der University of Adelaide wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Die wichtigste Voraussetzung für diese Arbeit waren die Unterstützung sowie die hervorragende Kooperation der Firma iotec GmbH und der Hochschule Osnabrück.

Literaturverzeichnis

- BUSEMEYER L., MENTRUP D., MÖLLER K., WUNDER E., ALHEIT K., HAHN V., MAURER H., REIF J., WÜRSCHUM T., MÜLLER J., RAHE F., RUCKELSHAUSEN A. (2013): BreedVision - A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding. *Sensors* 13, 3, 2830–2847.
- DZINAJ T., KLEINE-HÖRSTKAMP S., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., BÖTTGER O., KEMPER M., MARQUERING J., NÄSCHER J., TRAUTZ D., WISSERODT E. (1998): Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 1998, Sonderheft XVI, 233–242.
- FANOURAKIS D., BRIESE C., MAX J.F., KLEINEN S., PUTZ A., FIORANI F., ULBRICH A., SCHURR U. (2014): Rapid determination of leaf area and plant height by using light curtain arrays in four species with contrasting shoot architecture. *Plant Methods*, 10:9.
- FENDER F., HANNEKEN M., IN DER STROTH S., KIELHORN A., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2006): *Sensor Fusion meets GPS: Individual Plant Detection*. Proceedings of CIGR EurAgEng, S. 279-280.
- FENDER F., HANNEKEN M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., SPICER M. (2005): Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 2005, Heft 40, 7–16.
- FURBANK R.T. TESTER M. (2011): Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends Plant Sci.* 16, 12, 635–644.
- HONSDORF N., MARCH T.J., BERGER B., TESTER M., PILLEN K. (2014): High-throughput phenotyping to detect drought tolerance QTL in wild barley introgression lines. *PLoS ONE* 9, 5, e97047.

- KIELHORN A., DZINAJ T., GELZE F., GRIMM J., KLEINE-HARTLAGE H., KLEINE-HÖRSTKAMP S., KUNTZE W., LINZ A., NÄSCHER J., RUCKELSHAUSEN A., TRAUTZ D., WISSERODT E. (2000):** Beikrautregulierung in Reihenkulturen - Sensorgesteuerte Querhacke in Mais. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 2000, Sonderheft XVII, 207–215.
- KOVACHEVA I., KERSSSEN S., MENTRUP D., ROSEMAN T., BILGES K., RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzenhöhen, Ähren und Grannen. *CBA Tagung 2014*.
- LI L., ZHANG Q., HUANG D. (2014):** A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors* 14, 11, 20078–20111.
- MONTES J.M., MELCHINGER A.E., REIF J.C. (2007):** Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends Plant Sci.* 12, 10, 433–436.
- MONTES J.M., TECHNOW F., DHILLON B.S., MAUCH F., MELCHINGER A.E. (2011):** High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions. *Field Crops Research* 121, 2, 268–273.
- RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen - ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. *Journal für Kulturpflanzen* 2014, 66 (2), 73–79.
- WINTERHALTER L., MISTELE B., SCHMIDHALTER U. (2013):** Evaluation of active and passive sensor systems in the field to phenotype maize hybrids with high-throughput. *Field Crops Research* 154, 236–245.

Automatisierte Wilderkennung im Grünland durch Fusion verschiedener Kamerasysteme und multispektrale Objekterfassung

Automated detection of game in grassland by fusion of different cameras and multispectral detection of objects

André Berghaus¹, Bernd Schniederbruns¹, Thomas Luhmann², Johannes Piechel², David Schwäke²

¹ *Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH, Heinrich-Krone-Straße 10, 48480 Spelle, Deutschland*

² *Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Jade Hochschule,*

Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg

Email: andre.berghaus@krone.de

Zusammenfassung: Durch die Kombination verschiedener Kamerasysteme wird eine vielversprechende Perspektive zur automatisierten Detektion unverdeckter Rehkitze und anderer Wildtiere im Grünland geschaffen. Dazu werden anhand von Testmessungen an lebenden Tieren sowie an Tierpräparaten in nachgestellten Szenen verschiedene Ansätze zur multispektralen Objekterfassung vorgestellt, mit denen eine Möglichkeit zur Differenzierung zwischen Wildtieren und ähnlich erscheinenden Objekten wie Steinen oder Maulwurfshügeln ermöglicht wird.

Dabei wird die Fusion der Signale von RGB-Farbkameras, NIR-Kameras (= Nahes Infrarot) und Thermalkameras beschrieben, wobei sowohl auf die geometrische Aussage der Aufnahmen, als auch auf die spektralen Informationen der einzelnen Kameras eingegangen wird.

Deskriptoren: multispektral, NIR, RGB, Wildtiererkennung

Abstract: *Through the combination of different camera systems a highly promising perspective for an automatic detection of uncovered fawns and other wild animals in grassland gets provided. Different approaches of multi-spectral object detection will be presented and evaluated by measurements of preparations and living animals in controlled sceneries. The presented approach shows a high capacity for the correct differentiation between wild animals and similar appearing objects like molehills or stones.*

The fusion of the signals delivered by color cameras, NIR cameras and thermal cameras is described, in particular the geometric information of the pictures and the spectral data of the different cameras.

Keywords: *Multispectral, NIR, RGB, Wild animals*

1 Motivation

Die Brut- und Setzzeiten vieler heimischer Wildtiere decken sich mit den idealen Erntezeitpunkten von Grünroggen zur Energieerzeugung sowie Acker- und Wiesen-gras zur Viehfuttermittelgewinnung. Daher werden häufig Rehkitze und auch andere Wildtiere im Zuge dieser Grünlandernten verletzt oder gar getötet. Über die direkte Gefährdung der Wildtiere hinaus entsteht hieraus zusätzlich eine Gefahr für die Viehbestände durch Botulismus aufgrund verunreinigten Futters. (LANDESJÄGERSCHAFT NIEDERSACHSEN 2010)

Aktuell werden zur Minimierung dieser Gefahren Techniken zur Vergrämung der Wildtiere oder zur manuellen Absuche der zu mähenden Flächen eingesetzt. Allerdings verlangen diese Methoden aufgrund der hohen Schlagkraft moderner Erntetechnik einen enormen Personalbedarf, bei gleichzeitig geringen Erfolgschancen aufgrund der guten Tarnung und des Verhaltens der Wildtiere. Hierbei werden unter anderem auch (luftgestützte) Thermalkameras eingesetzt, deren Bilddaten aber noch manuell auszuwerten sind, wobei es häufig zu Fehlinterpretation von ähnlich erscheinenden Objekten kommt. (WIMMER *et al.* 2013)

Motiviert durch diese Tatsachen wird nach Lösungen zur (teil-) automatisierten Detektion von Wildtieren im Grünland gesucht, wobei die Fusion eines multispektralen Mehrkameranagements vielversprechende Ansätze liefert.

2 Prozess der Wildrettung

Die Rettung der Wildtiere in der Grünlandernte lässt sich in einem Prozess abbilden, der sich von der Aufnahme der Rohdaten bis zur Bergung des Tieres erstreckt. Dieser Prozess lässt sich grob in drei Abschnitte gliedern, wie in **Abbildung 1** veranschaulicht ist.

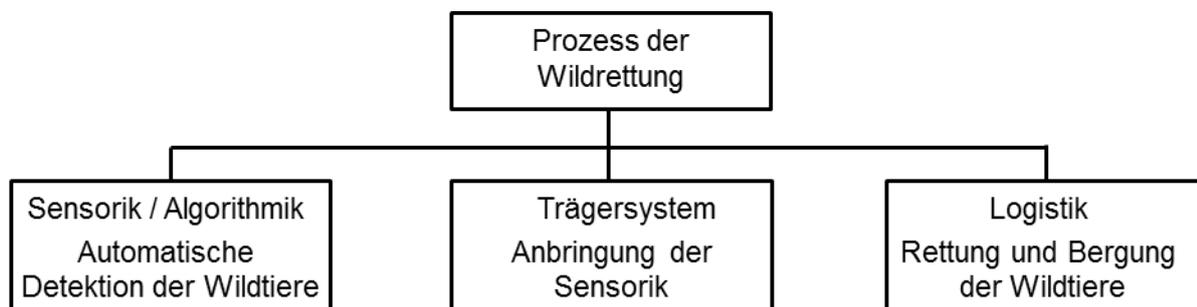


Abbildung 1: Prozessgliederung der Wildrettung

Obwohl der Prozess der Wildrettung zwingend der Logistik zur Rettung und Bergung der Wildtiere und auch eines Trägersystems zur Anbringung der Sensorik bedarf, wird hier ausschließlich die automatisierte Detektion der Wildtiere und das dafür verwendete Mehrkameranagements beschrieben, da diese die kritischste Komponente in diesem Prozess darstellt.

3 Sensorik

Als Sensorik wird das in **Abbildung 2** dargestellte Mehrkameranystem eingesetzt, das aus einer Thermalkamera, einer RGB-Farbkamera und einer NIR-Kamera besteht. Diese Kameras befinden sich auf einem gemeinsamen Träger und sind starr zueinander ausgerichtet und auf einen fixen Objektabstand fokussiert. Durch geometrische Bildverzerrung wird eine Überlagerung der aufgenommenen Bilder gewährleistet.



Abbildung 2: Mehrkameranystem

Der unterstützende Einsatz von Thermalkameras gehört auch heute schon bei der manuellen Absuche von zu erntenden Flächen zum Stand der Technik, wobei die gewonnenen Bilddaten manuell ausgewertet werden und es dabei häufig zu Fehlinterpretationen von Steinen und Erdflächen kommt, die aufgrund von Sonneneinstrahlung eine ähnliche thermale Signatur und Geometrie haben wie Wildtiere von vergleichbarer Größe. Als Beleg dafür ist in **Abbildung 3** die Wärmesignatur verschiedener Objekte auf einer Testfläche aufgetragen, die über den zeitlichen Verlauf gesehen unterschiedlich stark von der Sonne aufgeheizt wurden. Daraus ist offensichtlich, dass allein anhand der Daten einer Thermalkamera eine eindeutige Differenzierung unterschiedlicher Objekte im Grünland nicht möglich ist. Die hier eingesetzte Thermalkamera „optris PI450“ arbeitet in einem Spektrum von 7500nm – 13000nm, was auch der Bandbreite anderer handelsüblicher Thermalkameras entspricht.

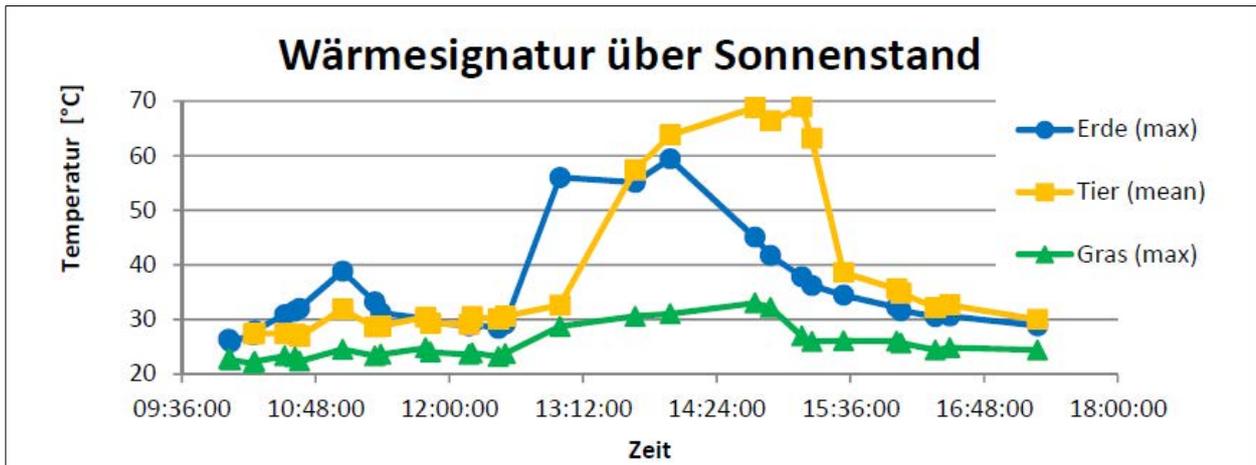


Abbildung 3: Wärmesignaturen verschiedener Objekte über die Zeit

Aufgrund grundlegender Untersuchungen der spektralen Signatur verschiedener Objekte - worunter auch lebende Tiere zu zählen sind - außerhalb des thermalen Bereiches mit einem Handspektrometer „RAMSES-ACC-VIS“ (320nm – 950nm) ergeben sich vielversprechende Unterscheidungskriterien, vor allem oberhalb des sichtbaren Bereiches. Um diesen Bereich intensiver untersuchen zu können wurde das Mehrkameranersystem neben einer RGB-Farbkamera „IDS UI-1460RE“ mit einem Spektrum von 380nm – 780nm um eine Nahinfrarotkamera „NIT WiDy 320 SWIR“ im Spektrum von 900nm – 1750nm erweitert.

Da die Intensitäten der RGB-Farbkamera als Grauwerte der einzelnen Farbkanäle Rot, Grün und Blau betrachtet werden können, ergibt sich zusammen mit den Grauwerten der Nahinfrarotkamera und der Thermalkamera ein fünfkanales Kamerasystem, das ein in **Abbildung 4** dargestelltes Spektrum von 380nm – 13000nm mit einigen Unterbrechungen abbildet.

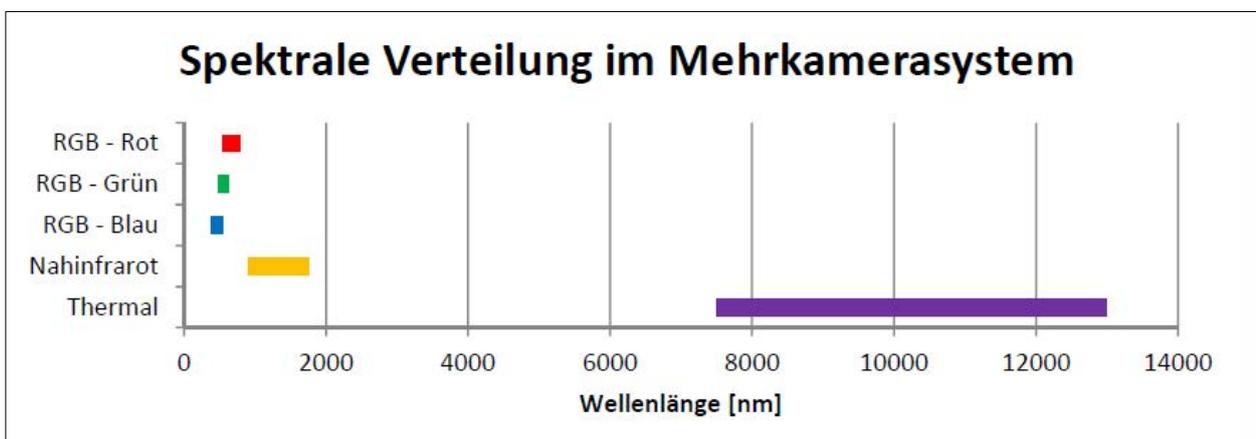


Abbildung 4: Spektrum des Mehrkameranersystems

4 Datenfusion und automatisierte Detektion

Als Grundlage für die Fusion der einzelnen Daten aus dem Mehrkamerasystem ist es unerlässlich, dass das Kamerasystem, wie schon oben erwähnt, auf Basis photogrammetrischer Verfahren (z.B. LUHMANN 2010) exakt kalibriert und orientiert ist, und dass die entstehenden Bilder geometrisch entzerrt sind. Zusätzlich werden mit Hilfe einer Onlinebildkorrektur eventuelle Restfehler der Entzerrung kompensiert. Dadurch wird sichergestellt, dass detektierten Objekten im Bild einer Kamera auch die richtigen Intensitäten aus den Daten der anderen Kameras zugeordnet werden können, um die Möglichkeit zu schaffen, jeden Bildpunkt fünfdimensional auswerten zu können. Auf dieser Basis lässt sich eine zweistufige Detektion aufbauen.

In der ersten Stufe werden in mehreren Schritten Objekte im Bild von der umgebenden Vegetation des Grünlandes getrennt. Dazu wurden verschiedene bekannte Indizes zur Vegetationsfilterung evaluiert, wobei der GRVI (= Green Red Vegetation Index) bei entsprechender Schwellwertdefinition bisher die vielversprechendsten Ergebnisse lieferte. Bei diesem Index werden nur die Intensitäten des grünen und roten Kanals der RGB-Farbkamera miteinander verrechnet, was dazu führt, dass die Position interessanter Objekte im Bild allein aus den Daten einer Kamera generiert werden kann. Allerdings sind zur Differenzierung des detektierten Objektes weitere Informationen erforderlich, die durch Einbeziehung der Daten aus den anderen Kameras gewonnen werden.

Die eigentliche Differenzierung der detektierten Objekte wird in einer zweiten Stufe durchgeführt. Dazu werden die Intensitäten in den einzelnen Wellenlängenbereichen verschiedener Testobjekte erfasst und diese in Klassen zusammengefasst. Aus diesen Werten werden Indizes und Schwellwerte abgeleitet, die eine automatische Differenzierung zwischen diesen Klassen ermöglichen. Um dies zu veranschaulichen sind in **Abbildung 5** die Signaturen verschiedener Objekte als Intensitäten der Kanäle Rot, Grün und Nahinfrarot in einem dreidimensionalen Raum aufgetragen. Ersichtlich ist, dass es zu Gruppenbildungen (Cluster) entsprechend der getroffenen Klassifizierung kommt.

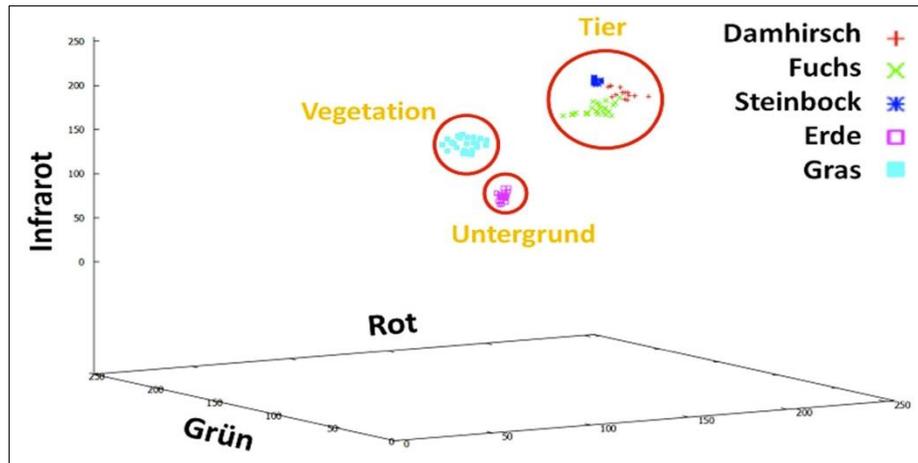


Abbildung 5: Dreidimensionale Darstellung der Signaturen verschiedener Objekte

Wie in **Abbildung 6** dargestellt, erfolgt diese zweistufige Detektion sequenziell in schnellen Folgen von Einzelbildauswertungen und liefert als Output einen Ausschnitt des Bildes der RGB-Farbkamera, um dem Bediener eine Möglichkeit zu geben, die Richtigkeit der automatisierten Detektion zu beurteilen. Dies ermöglicht zeitgleich die Implementierung eines Selbstlernverhaltens durch Rückkoppelung der Bedienerentscheidungen in die Schwellwertbestimmung.

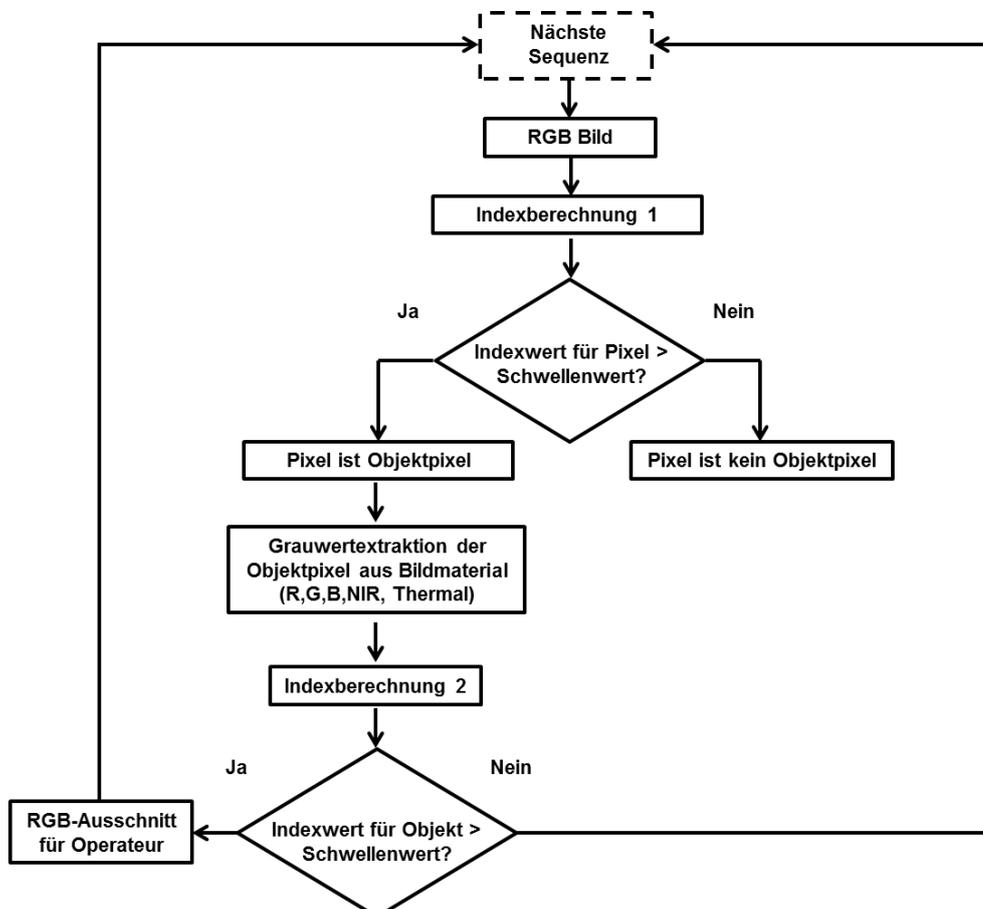


Abbildung 6: Flussdiagramm der automatischen Detektion

Erste Vorversuche zu diesem Verfahren in definierten Testszenarien zeigen gute Detektionsquoten dieses Konzeptes, was auch durch erste realitätsnahe Versuche tendenziell bestätigt wird. Dennoch ist weitere intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig, um dieses Konzept praxisgerecht auszubauen.

Literaturverzeichnis

- DE LANGE N. (2006):** Geoinformatik in Theorie und Praxis (2)
- LUHMANN T. (2010):** Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, Heidelberg (3)
- LUHMANN T., OHM J., PIECHEL J., ROELFS T. (2010):** Geometrische Kalibrierung von Thermografiekameras. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformationen S. 5 – 15
- LANDESJÄGERSCHAFT NIEDERSACHSEN E.V. (2010):** Mähtod vermeiden
- MOTOHKA T., NASHARA K., OGUMA H., TSUCHIDA S. (2010):** Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology. Remote Sensing 2 2010 S. 2369 – 2387
- WIMMER T., ISRAEL M., HESCHBERGER P., WEICHMANN A. (2013):** Rehkitzrettung mit dem fliegenden Wildretter. Bornimer Agrartechnische Berichte (81) S. 85 – 95
- SCHWÄKE D. (2014):** Verarbeitung von Bildern eines multispektralen Mehrkamerasystems zur Klassifizierung von Objekten auf landwirtschaftlich genutzten Feldern. Unveröffentlichte Masterarbeit, Jade Hochschule.
- BERGHAUS A., SCHNIEDERBRUNS B., LUHMANN T., PIECHEL J., SCHWÄKE D. (2014):** Multispektrale Objekterfassung durch Fusion verschiedener Kamerasysteme. Land.Technik 2014: S. 47 – 52

Die Field Imaging Plattform (FIP) - Eine automatisierte Pflanzenphänotypisierungsanlage im Feld

Field imaging platform (FIP) – an automated system for plant phenotyping in the field

Norbert Kirchgessner, Frank Liebisch, Andreas Hund, Achim Walter

ETH Zürich, Institut für Agrarwissenschaften, Kulturpflanzenwissenschaften Universitätstrasse 2, LFW C58, 8092 Zürich, Schweiz

Email: norbert.kirchgessner@usys.ethz.ch

Zusammenfassung: Im Folgenden beschreiben wir eine neue Anlage für die automatische Messung mehrerer Pflanzenmerkmale auf Basis von Fernerkundungstechniken auf dem Feld. Hierfür wurde ein Seilroboter auf dem Gelände der Forschungsstation für Pflanzenwissenschaften Lindau-Eschikon der ETH Zürich installiert, der als Field Imaging Plattform (FIP) konzipiert ist. Das System trägt einen Sensorkopf, der über dem Feld von 1 ha Fläche frei in drei Dimensionen positioniert werden kann und automatisierte Messungen mit sechs Sensoren für die Phänotypisierung ermöglicht.

Deskriptoren: Pflanzenmerkmale, Phänotypisierung, Seilroboter

Abstract: *We present a new platform for field plant phenotyping which is capable of taking automatic measurements of various plant traits based on remote sensing techniques. Therefore a rigging system was installed at ETH Zürich research station for plant sciences in Eschikon, Lindau, which is designed as a Field Imaging Platform (FIP). The system carries a sensorhead which can be freely moved and above the field of about 1 ha area. A setup of six sensors enables for automatic phenotypic measurements.*

Keywords: *Field plant phenotyping platform*

1 Einleitung

Pflanzenphänotypisierung gewinnt in der modernen Züchtung immer mehr an Bedeutung (RICHARDS *et al.* 2010). Versuche sollten in der natürlichen Umgebung der Kulturpflanze an möglichst vielen Genotypen mit vielen Wiederholungen und stattfinden. Die erhobenen Merkmale sollen möglichst hoch mit dem Zielmerkmal (z.B. Ertrag) korreliert sein. Zur Phänotypisierung werden bisher meist fahrende – (WHITE *et al.* 2012, BUSEMEYER *et al.* 2013, DEERY *et al.* 2014) oder unbemannte fliegende Plattformen (Unmanned Aerial Systems, UAS) verwendet. Fahrende Plattformen zeichnen sich durch hohe

Zuladung und beliebige Sensorkombinationen aus, können jedoch nur bei guten Bodenverhältnissen eingesetzt werden. Der maximale Sensor-Bodenabstand von etwa 3 m verhindert den späten Einsatz bei hohen Kulturen wie Mais, ermöglicht jedoch die Abschattung gegen Sonnenlicht und verbessert damit die Anwendung aktiver Messmethoden. UAS können in kurzer Zeit Messdaten grosser Flächen unabhängig von den Bodenverhältnissen aufnehmen, haben jedoch eine vergleichsweise geringe Zuladung und messen daher meist mit einem Sensor (ANTHONY *et al.* 2014, LELONG *et al.* 2008). Die Akkukapazität und das Absturzrisiko sind weitere begrenzende Faktoren dieser Plattformen.

Die FIP vereint die Vorteile der beiden vorgenannten Plattformen mit einer genauen Positionierung, einer hohen Zuladung und der Unabhängigkeit von den Bodenverhältnissen, das System kann rund 6 Stunden unterbrechungsfrei messen.

2 Konzept

Die FIP ist als automatische Phänotypisierungsplattform für Kulturpflanzen im überwachten Betrieb konzipiert. Sie besteht aus dem Masten an den Ecken des Versuchsfeldes, dem Seilsystem und den Sensoren. Das Seilsystem besteht wiederum aus den Steuerrechnern, den Winden, den Seilen und dem Sensorkopf.

3 Masten und Seilsystem

Sämtliche baulichen Maßnahmen wurden von ETH Bauten in Zusammenarbeit mit weiteren Unternehmen geplant und erstellt. An den Ecken des 130 m x 100 m grossen Versuchsfeldes wurde jeweils ein 24 m hoher Mast errichtet, an dessen Spitze Umlenkrollen montiert wurde. Um eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht zu erreichen wurde eine Dreibeinkonstruktion gewählt.



Abbildung 1: FIP Feld mit den Gebäuden Forschungsstation für Pflanzenwissenschaften Lindau-Eschikon der ETH Zürich im Vordergrund (Bild mit freundlicher Erlaubnis von D. Constantin, M. Rehak and Y. Akhtman, EPFL ENAC TOPO)

Das Seilsystem wurde zusammen mit dem Sensorkopf von der Firma Spidercam® (Feistritz, Österreich) entwickelt und gebaut. An jedem Mastfuß befindet sich eine Winde die durch ein Haus vor Wettereinflüssen geschützt ist. Der Sensorkopf wird von acht Seilen getragen, die durch die Umlenkrollen an den Mastspitzen zu den Winden umgelenkt werden. Die Sicherheit des Systems ist durch zwei Seile, die von jeder Winde zum Sensorkopf führen und die sechsfache Sicherheit, mit der die Seile ausgelegt sind sehr hoch. Durch koordinierte Veränderung der Seillängen durch die Winden kann der Sensorkopf beliebig auf bis zu 7 m Höhe über dem Feld positioniert werden.



Abbildung 2: FIP Steuerstand mit Kontrollpanel, Monitor, Maus Tastatur des Kontrollcomputers und Notaus.



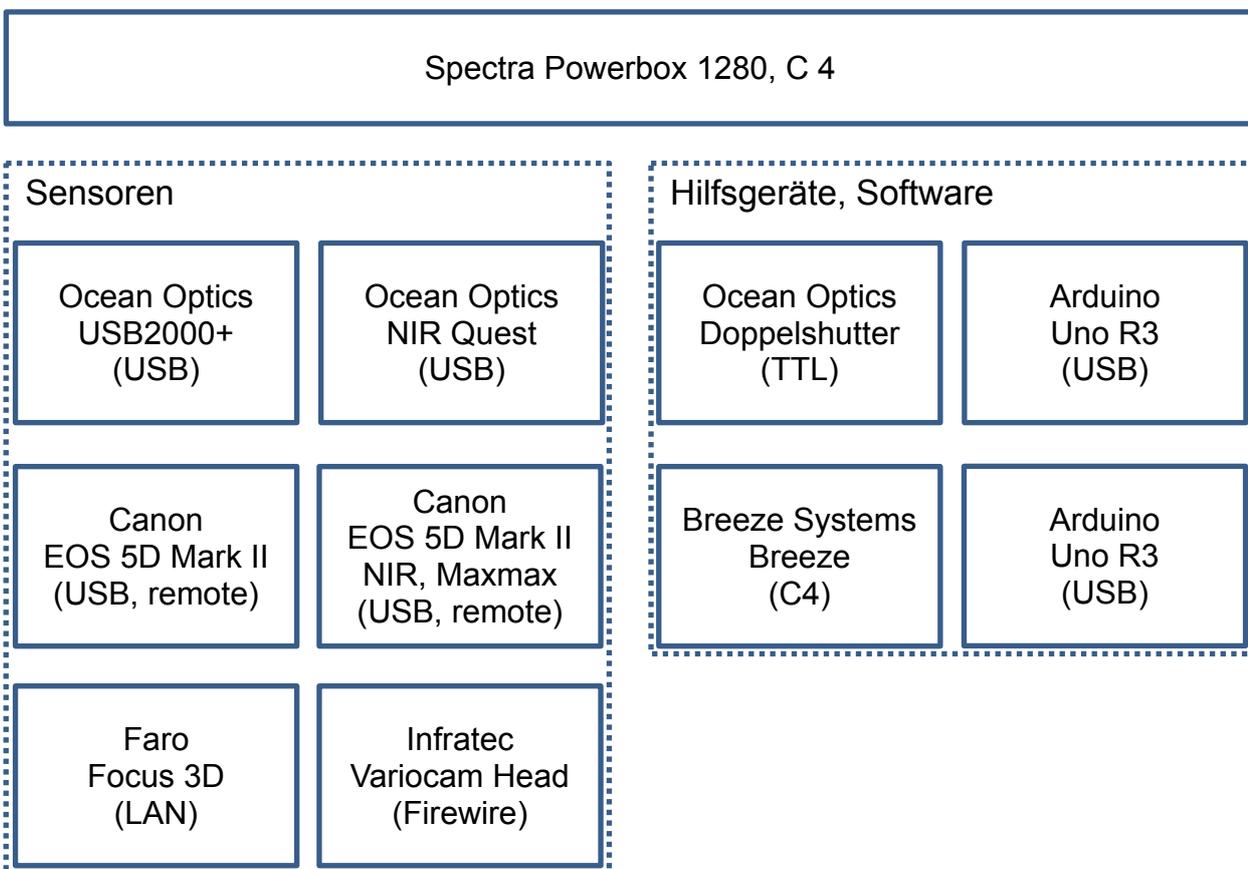
Abbildung 3: links Sensorkopf, Mast an der Feldecke mit Haus zum Schutz der Winden. Rechts: Detailaufnahme des Sensorkopfes. Im oberen Gehäuse sind die Akkus, die Spektrometer und der Steuerrechner für die Sensoren untergebracht, das untere schwarze Gehäuse beherbergt Ultraschallsensoren und den Antrieb der Pan-Achse. Unten ist der Sensorrahmen zu sehen an dem links die Canon DSLR Kameras, in der Mitte der Laserscanner und rechts die Thermokamera, sowie die Systemkamera zu erkennen.

4 Sensoren

Der Sensorkopf ist mit sechs Sensoren (siehe **Abbildung 2**) ausgestattet: einer visuellen -, einer modifizierten – und einer Infrarotkamera sowie mit zwei Spektrometern und einem Laserscanner, diese sind zusammen mit den Hilfsgeräten für die Ansteuerung und der Software in **Tabelle 1** gelistet. Die Sensoreinheit kann um zwei Achsen geschwenkt werden, was beliebige Beobachtungsrichtungen ermöglicht. Eine integrierte Kamera liefert ein Livebild aus der Sensorperspektive und ermöglicht deren genaue Positionierung. Um Flexibilität für zukünftige Messungen und Anwendungen zu gewährleisten, kann die Sensorkonfiguration unter Beachtung der Tragfähigkeit von 12 kg frei variiert werden.

In der ersten Sensorkonfiguration sind folgende Kameras enthalten: Canon EOS 5D Mark II (Canon, Tokyo, Japan), Canon EOS 5D Mark II NIR (modified by LDP LLD, Carlsted, USA), Thermokamera VarioCAM head 600 (Infratec GmbH, Dresden, Germany), ein Laserscanner Faro Focus 3D (Faro Technologies Inc., Lake Mary, USA) und Spektrometer USB 2000+, NIRQUEST (Ocean Optics, Florida, USA).

Tabelle 1: Sensorübersicht mit Schnittstellenspezifikation, Hilfsgeräten und Software. Als Steuerrechner der Sensoren dient die Spectra Powerbox 1280, C4.



5 Daten

Das gesamte Positionierungssystem ist, ebenso wie die Sensoren, frei programmierbar. Die Ansteuerung der Komponenten erfolgt über Matlab (Natick, MA, USA) durch XML Pakete, die per TCPIP übertragen werden.

Daher können Messprogramme für jedes Experiment erstellt und bei Bedarf ausgeführt werden, die alle Plots eines Experiments automatisiert erfassen. Dies beinhaltet die Aufnahme einzelner Plots in einem Experiment mit über 700 Winterweizensorten mit einer modifizierten Spiegelreflexkamera, die eine robuste Segmentierung und damit die Bestimmung des Pflanzenbedeckungsgrades ermöglicht.

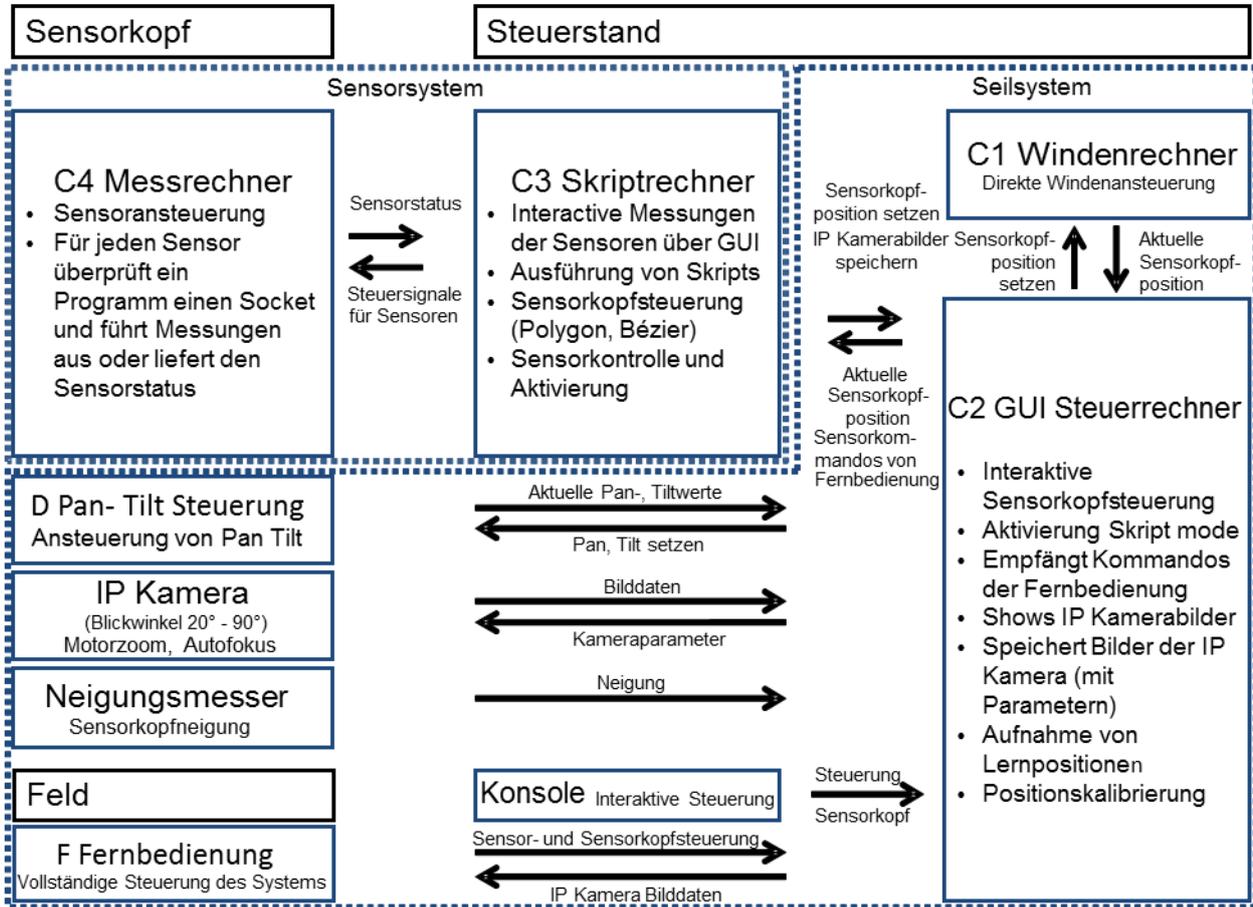
Während der Ausführung eines Messprogramms werden die Plotpositionen nacheinander vom Sensorkopf angefahren und die Sensoren ausgelöst. Die Messdaten werden automatisch im passenden Filesystem abgelegt und passend benannt.

6 Rechnerkonzept und Sicherheit

Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, sind die Steuerrechner des Seilsystems installiert geliefert und übernehmen keine weiteren Aufgaben (**Tabelle 2**). Die Steuerung der Sensoren erfolgt über einen Rechner auf dem Sensorkopf und einen Skriptrechner im Steuerstand. Dieser kommuniziert per TCPIP mit dem Steuerrechner des Systems und kann somit den Sensorkopf positionieren.

Zur Vermeidung von Kollisionen des Sensorkopfes mit Personen, Fahrzeugen oder dem Boden sind Ultraschallsensoren auf dem Sensorkopf installiert, die das System bei zu geringem Abstand zur Umgebung zum Stillstand bringen.

Tabelle 2: Rechnerkonzept mit Datenströmen. Die Kommunikation zwischen den Komponenten erfolgt über TCP/IP. Die Systemrechner C1 und C2 steuern die Winden an. C3 dient als Skriptrechner und kann im automatischen Betrieb die gesamte Anlage ansteuern. Damit wird auch C4 gesteuert, der die Sensoransteuerung übernimmt.



7 Status und Ausblick

Bis heute wurden zahlreiche Testmessungen ausgeführt um das System in einem automatisierten, überwachten Modus zu betreiben.

Die FIP ermöglicht die Messung relevanter phänotypischer Merkmale, die durch die Aufhängung des Sensorkopfes an acht Seilen und die integrierten Ultraschallsensoren zur Kollisionsvermeidung schnell, effizient, sicher und gut reproduzierbar ist. Während des Messprozesses werden weder Boden noch Pflanzen berührt oder gestört, dadurch sind die Messungen unabhängig von den Bodenverhältnissen.

Die Installation des Systems verspricht eine ökonomische, robuste und schnelle Aufnahme umfangreicher Datensätze zur Pflanzenphänotypisierung auf dem Feld, wodurch eine Lücke der bisher verwendeten Phänotypisierungsplattformen geschlossen werden soll.

Danksagung

Die Konzeptionierung und Erstellung der FIP wurde durch zahlreiche helfende Köpfe und Hände möglich denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei. Zuerst sei Herr Leeger von ETH Bauten genannt, der die Planung der baulichen Arbeiten in Kooperation mit dem Architekturbüro Hagi und der Conzett Bronzini Gartmann AG hervorragend organisierte. Die Ausführung wurde von den Firmen Weilenmann AG, Stocker Tiefbau, Rettich Stahlbau GmbH, Krattiger Holzbau AG und Schlosserei Hyler geleistet.

Die Elektroplanung wurde von der Firma Mettler + Partner durchgeführt, die Elektroinstallation von der Schultheis-Möckli AG ausgeführt. Herr Meder vom ETH Einkauf war eine unverzichtbare Hilfe beim Erstellen der Ausschreibung, die auf Basis eines Konzeptpapiers der Firma LSR GmbH geschrieben wurde.

Besonderer Dank gilt den kooperativen Nachbarn sowie dem Kanton Zürich und der Gemeinde Lindau genannt, die dem Projekt stets positiv gegenüber stehen.

Am Konzept der Anlage und der Lösung vieler Details haben Zahlreiche Kollegen mitgewirkt, denen wir an dieser Stelle ebenfalls ganz herzlich danken.

Literaturverzeichnis

- ANTHONY D., ELBAUM S., LORENZ A., DETWEILER C. (2014):** On Crop Height Estimation with UAVs 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014) September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA
- BUSEMEYER L., RUCKELSHAUSEN A., MÖLLER K., MELCHINGER A.E., ALHEIT K.V., MAURER H.P., HAHN V., WEISSMANN E.A., REIF J.C., WÜRSCHUM T. (2013):** Precision phenotyping of biomass accumulation in triticale reveals temporal genetic patterns of regulation. *Scientific reports* 3
- DEERY D., JIMENEZ-BERNI J., JONES H., SIRAUTL X. FURBANK R. (2014):** Proximal Remote Sensing Buggies and Potential Applications for Field-Based Phenotyping *Agronomy* 2014, 5, 349-379; doi:10.3390/agronomy4030349
- LELONG C.C.D., BURGER P., JUBELIN G., ROUX B., LABBÉ S., BARET F. (2008):** Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots *Sensors* 2008, 8, 3557-3585; DOI: 10.3390/s8053557
- RICHARDS R.A., REBETZKE G.J., WATT M., CONDON A.G., SPIELMEYER W., DOLFERUS R. (2010):** Breeding for improved water productivity in temperate cereals: phenotyping, quantitative trait loci, markers and the selection environment. *Functional Plant Biology* 37, 85–97. <http://dx.doi.org/10.1071/FP09219>
- WHITE J.W., ANDRADE-SANCHEZ P., GORE M.A., BRONSON K.F., COFFELT T.A., CONLEY M.M., FELDMANN K.A., FRENCH A.N., HEUN J.T., HUNSAKER D.J., JENKS M.A., KIMBALL B.A., ROTH R.L., STRAND R.J., THORP K.R., WALL G.W., WANG G. (2012):** Field-based phenomics for plant genetics research. *Field Crops Research* 133(0): 101-112.

Einführung von Multi-sensor Plattformen zur detaillierten Beschreibung von Pflanzen während der gesamten Wachstumsperiode

Introducing multi-sensor platforms for detailed characterization of plant canopies during the entire growing season

Stefan Paulus, Tino Dornbusch, Kevin Nagel

LemnaTec GmbH, Pascalstr. 59, 52076 Aachen

Email: (stefan.paulus)(tino.dornbusch)(kevin.nagel)@lemnatec.de

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren hat sich die digitale Phänotypisierung als wichtiges Instrument zum Verständnis der Interaktion zwischen Pflanze und Umgebung in Pflanzenzüchtung und Pflanzenwissenschaften etabliert. Der Begriff Phänotyp ist hierbei weit gefasst und umfasst neben dem äußeren Erscheinungsbild der Pflanze auch physiologische Kenngrößen wie z.B. den Chlorophyllgehalt. Eines der wichtigsten Ziele der Phänotypisierung ist dabei die Suche nach hocheffizienten, resistenten und ressourceneffizienten Sorten, die an zukünftige Klimabedingungen angepasst sind.

Dabei sind bei der Phänotypisierung, speziell im Labor- und Gewächshausmaßstab, Hochdurchsatzansätze weit verbreitet. Auf Feldebene sind diese hingegen ungleich schwieriger durchzuführen. Hier stellen vor allem die täglich und jährlich schwankenden Umweltbedingungen das größte Problem dar. Bis heute benutzen Phänotypisierungsansätze verschiedenste Sensoren (bspw. RGB oder IR), die durch unbemannte Kopter, Traktoren oder händisch über das Feld bewegt werden. Aufgenommen werden Informationen über den Blattflächenindex, den Chlorophyllgehalt, Keimungsraten, Wasserstress oder Wachstumskinetiken. Diese phänotypischen Daten werden benutzt, um Ertragspotential und -stabilität einer Pflanze in einer gegebenen Umwelt zu evaluieren.

Die Herausforderung des hochgenauen Phänotypisierens von Pflanzen während der gesamten Wachstumsperiode besteht darin, die Sensoren in regelmäßigen Zeitintervallen mit hoher Genauigkeit immer an derselben Stelle zu positionieren, um einen Ausschnitt des Pflanzenbestandes auf dem Feld zu beobachten und Wachstumskinetiken abzuleiten. Wir stellen in diesem Artikel eine schienenmontierte Multisensor-Phänotypisierungsplattform vor, die diese Positionierung beherrscht. Der Prototyp ist in der Lage, ein Feld von 1000 m² (10m Breite und 100 m Länge) zu befahren und Daten mit verschiedenen Sensoren über Pflanzenfarbe (RGB), Wassergehalt (NIR), photosynthetische Effizienz (Fluoreszenz), Temperatur (IR Thermographie) oder Bestandshöhe (3D Laserscanner) aufzunehmen.

Kenngößen, wie der Blattflächenindex (LAI), werden durch RGB Kameras ermittelt und durch 3D Höheninformationen (Laserscanner) vervollständigt. Insbesondere 3D Parameter wurden in den vergangenen Jahren verstärkt benutzt, um Pflanzen zu charakterisieren. Sie ermöglichen eine detailreichere Beschreibung von Pflanzen und Pflanzenorganen. Durch die Fusion der Daten von Multi-Sensor Plattformen (z.B. LAI, Chlorophyllgehalt, Temperatur) ergeben sich interessante Möglichkeiten, um multi-dimensionale Feldkarten zu erzeugen und somit Wachstum und Ertragsbildung besser zu verstehen.

Deskriptoren: Phänotypisierung, Sensorfusion, Parametrisierung, Wachstumsmonitoring

Abstract: *In recent years, digital phenotyping has increasingly been recognized as an important tool in plant breeding and plant physiology to better understand plant-environment interactions. The concept phenotype encompasses a broad range of observe- and measurable biological features, including plant morphology (shape) and plant physiology (e.g. chlorophyll content). The goal is to search for high-yielding yet resistant cultivars that are resource-efficient and suitable for future climatic conditions.*

Especially on laboratory and green-house scale, high-throughput phenotyping approaches have been established, whereas applications in the field are more difficult to implement. Therein, the diurnal or annual variability of environmental conditions represents a major problem. Until now, phenotyping approaches use various sensors (e.g. RGB or IR cameras), which are carried by using unmanned aerial vehicles, tractors or other handheld devices. Acquired data is used to get information on leaf area index, chlorophyll content, germination rates, water stress or growth kinetics. This phenotypic data is used to evaluate the performance of a crop in a given environment.

High precision crop phenotyping over an entire growing season is challenging, because sensors need to be positioned at the same precise location to monitor small regions in the field over time. Therefore a large degree of automation for temporally high-resolution measurements is essential. Here, we present a multi-sensor phenotyping platform mounted on rails. The prototype covers 1000m² (10m in width and 100m in length) and is equipped with a multisensory platform to monitor: plant color (RGB), water content (NIR), photosynthetic efficiency (fluorescence), temperature (IR thermography) and plant height (laser scanner).

Traits like leaf area index (LAI) derived from 2D images (camera) are complemented by 3D height information (laser scanner). Especially traits derived from 3D measurements have raised interest in the past years, because they provide possibilities for more detailed description of plants and even of individual organs. By using multi-sensor platforms the generation of multi-dimensional field maps is possible. This opens new opportunities to better understand crop growth and yield formation under field conditions.

Keywords: *Phenotyping, sensor fusion, parameterisation, growth monitoring*

1 Pflanzenphysiologische Einführung

Erträge in der Landwirtschaft müssen bis Mitte dieses Jahrhunderts verdoppelt werden, um die wachsende Weltbevölkerung ernähren zu können (TILMAN *et al.* 2011, www.fao.org). Zugleich können die landwirtschaftlichen Nutzflächen wegen Landnutzungskonflikten nicht in gleichem Maße vergrößert werden. Dies stellt wiederum eine besondere Herausforderung an Pflanzenzüchtung und –bau dar, da die Erträge dennoch jährlich um ca. 2,4% steigen müssten. Dem steht eine aktuelle Steigerung von 1,3% gegenüber (RAY *et al.* 2012, RAY *et al.* 2013). Dass dies kein unrealistisches Szenario darstellt, hat die Verdreifachung der Getreideerträge seit der ersten Grünen Revolution vor ca. 50 Jahren gezeigt. Dabei gingen technischer und züchterischer Fortschritt Hand in Hand.

Das Hauptselektionskriterium von Pflanzenzüchtern ist seither der Phänotyp, lange vor der Entdeckung der DNS und markergestützter Selektion. Mit der „Molekularen Züchtung“ stehen der Pflanzenzüchtung heute wichtige Werkzeuge zur Verfügung, um neue Herausforderungen, die an Sorten gestellt sind, zu meistern. Dabei steht die Erkennung und Nutzung von genomischen Regionen im Vordergrund, die neben der Ertragskomponente auch die Stress- und Schädlingstoleranz kodieren. Die Entwicklung von modernen, ertragreichen Sorten muss in der Lage sein, die bestmögliche genetische Variabilität mit Bezug auf die Wachstumsfaktoren zu finden. Da das derzeitige Verständnis der Genotyp-Umwelt Wechselwirkung noch weit davon entfernt ist, quantitative Aussagen zu treffen, ist der Zufall ein Teil des Erfolgsrezeptes. Kurz gesagt: je mehr Genotypen getestet werden können, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit einen Treffer zu erzielen, also einen gut angepassten Genotyp zu finden. Pflanzenzüchter müssen in die Lage versetzt werden, eine Vielzahl von Genotypen mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand zu phänotypisieren. Um die nötige Ertragssteigerung in der Landwirtschaft zu erreichen, müssen dringend effiziente Züchtungsstrategien implementiert werden, die Geno- und Phänotypisierung beinhalten. Die Fortschritte in der Genotypisierung bieten die Möglichkeit, genomische Informationen schnell und kostengünstig zu akquirieren.

Im Gegensatz zu den rasanten Fortschritten in der Genotypisierung ist die Phänotypisierung nicht im gleichen Maße gewachsen. Die gesammelten genetischen Informationen sind nur dann sinnvoll nutzbar, wenn man versteht wie diese in einen Phänotyp umgesetzt werden. Das Ganze wird noch komplexer, da die Genotyp-Phänotyp-Umwelt Wechselwirkung mit in Betracht gezogen werden muss. Dementsprechend müssen die Umweltbedingungen gemessen oder konstant gehalten werden, um Rückschlüsse über den Einfluss des Genotyps auf den Phänotyp zu ziehen. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Phänotypisierung zu, da diese teuer, arbeitsintensiv und fehleranfällig ist. Die Kosten werden hier, im Gegensatz zur Genotypisierung, in den kommenden Jahren nicht wesentlich sinken.

Pflanzenzüchter haben ihre Selektionsentscheidungen traditionell auf Grundlage von langjährigen Feldversuchen in unterschiedlichen Umweltbedingungen getroffen. Mit Hil-

fe statistischer Modelle kann man so Umwelt- und Genotypeinflüsse trennen. Dem entgegen stehen Versuche unter kontrollierten Umweltbedingungen, typischerweise in Gewächshäusern in denen Pflanzen individuell oder als Minibestand kultiviert werden. Weltweit sind dazu mehrere Zentren etabliert worden, z.B. *Jülich Plant Phenotyping-JPPC* (Jülich, Germany), *das Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung-IPK* (Gatersleben, Germany), *The Plant Accelerator* (University of Adelaide, Australia), oder *The High Resolution Plant Phenomics Center-HRPPC* (CSIRO Plant Industry, Canberra Australia).

Auch wenn Phänotypisierungsexperimente auf Gewächshausebene eine wichtige Bedeutung haben, so können sie die Interaktion zwischen Pflanze und Umwelt nur teilweise abbilden. Deshalb kommt der Phänotypisierung auf Bestandesebene unter Freilandbedingungen in Zukunft eine verstärkte Bedeutung zu.

2 State-of-the-Art Parameter

Die Parametrisierung von Pflanzen mit Hilfe optischer Sensoren ist seit langem eine breit eingesetzte Technik um die Entwicklung von Pflanzen im Labor quantitativ zu beschreiben. Parameter wie Breite und Höhe lassen sich automatisiert und im Hochdurchsatz aus zweidimensionalen (2D) Fotos ableiten (HARTMANN *et al.* 2011) und sind Standardoperationen in aktuellen Softwarepaketen wie LemnaGrid (LemnaTec GmbH, Aachen, Germany).

Eine Technik, die sehr vollständige und hochauflösende dreidimensionale (3D) Modelle der Pflanzengeometrie erzeugt, ist Laserscanning (OMASA *et al.* 2007, DORNBUSCH *et al.* 2014). Verglichen mit herkömmlichen Messmethoden sind, zumindest auf Laborebene, sehr hohe Genauigkeiten erzielbar (PAULUS *et al.* 2014). Neben Bestimmung von Höhe und Ausdehnung der Gesamtpflanze oder der Länge und Breite von Blättern, lassen sich auch sehr genau Volumendaten z.B. der Stängel automatisiert ableiten (PAULUS *et al.* 2014b).

Messungen auf Feldebene sind durch die Registrierung (Fusion) der Einzelscans, Wetterbedingungen und durch den auftretenden Trade-off zwischen Reichweite und Genauigkeit zwar weniger hoch aufgelöst, sind aber dennoch ein wichtiges Werkzeug zur 3D Beschreibung der Geometrie bspw. zur Erstellung von Höhenkarten während verschiedener Wachstumszeitpunkte (TILLY *et al.* 2013).

3D Modelle können auch durch den Einsatz von Structure-from-Motion Ansätzen aus RGB Bildern, aufgenommen bspw. durch *unmanned flying vehicles* (UAVs), errechnet werden (BENDIG *et al.* 2014). Hier hat man neben der 3D Information auch Zugriff auf die radiometrischen Informationen der Kamera. Die 3D Daten können damit angereichert werden und stehen nun als 4D Daten zur Verfügung. Denkbar ist nun eine weitere Anreicherung dieser 4D Modelle mit Daten aus Hyperspektral- oder Infrarot (IR)-Kameras. Dazu müssen allerdings die einzelnen Sensoren zueinander kalibriert werden. Erste Ansätze dazu wurden kürzlich veröffentlicht (BEHMANN *et al.* 2014). Nur so ist

die Erstellung multidimensionaler Modelle von Pflanzen, die neben der Geometrie auch radiometrische Informationen beinhalten, möglich. Aktuelle Klassifikationsansätze, die auf Daten eines Sensors arbeiten, können mit der Hilfe von Machine Learning sinnvoll erweitert werden um bspw. eine höhere Genauigkeit zu erzielen.

3 Anforderungen an Multi-Sensor Plattformen

Der Einsatz von Multi-Sensor Plattformen auf Feldebene beschreibt eine große Herausforderung, da sich Konzepte aus dem Labor oder Gewächshaus nicht nativ auf das Feld übertragen lassen. Die Sensortechnik muss gegenüber Witterungseinflüssen geschützt sein, z.B. Bewegung durch Wind, dem Eindringen von Wasser durch Regen oder Tau sowie resistent sein gegenüber Temperaturschwankungen und Frostschäden. Neben diesen Anforderungen an die Sensortechnik ist die Ansteuerung der Sensorplattform von entscheidender Bedeutung. Positionen müssen hochgenau und wiederholt angesteuert werden, um ein und dieselbe Pflanze oder die Regionen eines Bestandes über die Zeit beobachten zu können. Dies erfordert eine hohe Genauigkeit der Steuermotoren, sowie eine genaue Vermessung der Orientierung und Positionierung der einzelnen Sensoren zueinander. Im Falle des LemnaTec Field-Systems (**Abbildung 1**) kommen hier neben RGB und IR Kameras Hyperspektralkameras, ein Laserhöhenscanner, ein NDVI und CO₂ Sensor, sowie ein PSII Sensor zum Einsatz. Jeder Sensor muss eigenständig und im Verbund kalibriert werden. Weiterhin sollte die Möglichkeit gegeben sein, die Kalibrierung im Betrieb zu testen und gegebenenfalls eine Rekalibrierung durchzuführen. Eine spezielle Herausforderung stellt die zeitliche Abfolge der Datenaufnahme dar. Fluoreszenz- und NDVI-Messungen können aufnahmebedingt nur nacheinander durchgeführt werden. Somit kann nicht immer sichergestellt werden, dass alle Aufnahmen einen identischen Zeitraum widerspiegeln. Einen weiteren wichtigen Baustein bildet die Anpassung des Sensorabstandes. Jeder Sensor benötigt einen angepassten Messabstand, bedingt durch das jeweilige Messprinzip (den Arbeitsbereich) und die angestrebte Genauigkeit. Das hier vorgestellte Field-System lässt sich schieneengebunden über eine Strecke von 100 Metern in Längsrichtung und 10 Metern in der Breite verschieben. Zur Anpassung des Messabstandes lässt sich die Plattform zwischen 4-5 m vertikal verschieben.

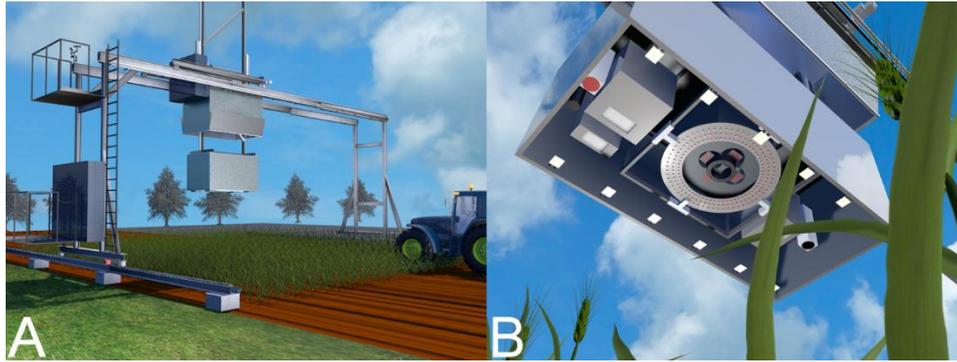


Abbildung 1: Das Field-System der Firma LemnaTec vereint den Einsatz verschiedener Sensoren und die wiederholte genaue Messung der gleichen Feldpositionen in einem verschiebbaren, wetterfesten Messsystem. Hyperspektralmessungen, 3D Abtastung, RGB Fotos und Fluoreszenzbilder können an nahezu allen Positionen des Feldes aufgenommen werden.

4 2D RGB Bildverarbeitung auf Feldebene

Es gibt viele Vorteile in der Verwendung der digitalen Bildtechnik, um Änderungen der vegetativen Oberflächen aufgrund verschiedener Bedingungen zu überwachen. Sie liefert objektive, zerstörungsfreie und konsistente Messungen. Eine Digitalkamera kann Hunderte von 2D-Farbbildern pro Stunde aufnehmen, so dass der Anwender diese Daten abspeichern und sie zu einem späteren Zeitpunkt analysieren kann. Im Vergleich zu Reflexionsmessungen (z.B. Spektrophotometer) von vegetativen Oberflächen, hat sich in der landwirtschaftlichen Forschung die digitale Bildanalyse in den letzten Jahren als eine effiziente alternative Methode bewährt (**Abbildung 2**). Als Beispiel sei hier die Nutzrasenforschung beschrieben. Traditionell begutachten Wissenschaftler die Rasenqualität durch Sichtprüfung mit subjektiven Bewertungen auf einer Skala von 1 bis 9. Diese Beurteilung ist die Summe verschiedener Faktoren: Rasenqualität, Dichte und Uniformität. In den letzten Jahren wurde die digitale Bildanalyse eingeführt, um Bedeckungsgrad bei Rasengras und Weizen zu quantifizieren.

Der Schlüssel zu dieser Methode ist die Berechnung eines Index, der als „dark green colour index“ bezeichnet wird (DGCi; KARCHER & RICHARDSON 2003). Die Berechnung des Index erfolgt durch Transformation des RGB-Farbraums in den HSL (Hue, Saturation, Lightness) Raum und die lineare Kombination der Komponenten. Studien haben gezeigt, dass es eine starke Übereinstimmung zwischen dem DGC Index und der Bestandsfarbe gibt. Dies deutet darauf hin, dass dieser Index zur objektiven Bewertung von Rasen genutzt werden kann.

Darüber hinaus wird die digitale Bildanalyse eingesetzt, um Pflanzenkrankheiten zu entdecken und deren Ausbreitung zu messen. Mit Hilfe der mit dem „dark green colour index“ klassifizierten Bilder und mit index-basierten Histogrammen kann bspw. die Größe von mit Krankheiten befallenen Flächen auf Feldern präzise bestimmt werden.

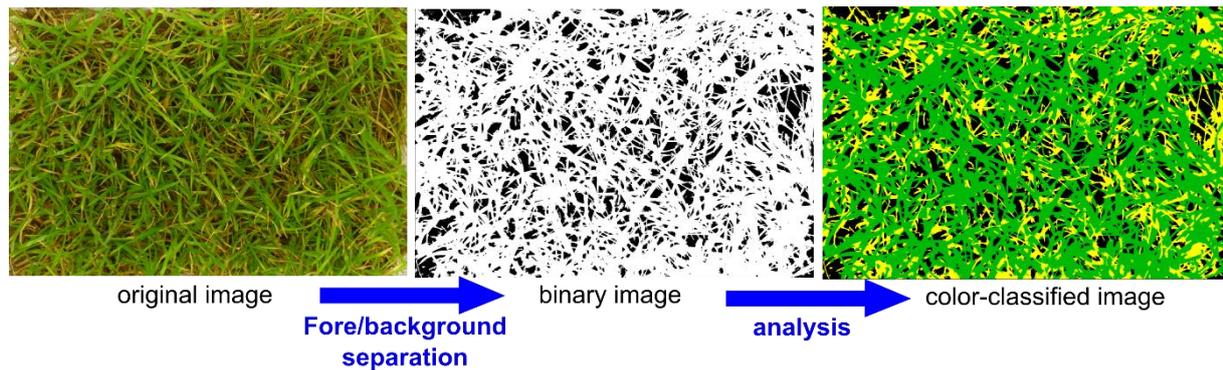


Abbildung 2: Auswertungsschema um Pflanzenbestände anhand von 2D Bildern zu charakterisieren. Der erste Schritt umfasst die Vordergrund/Hintergrundtrennung, aus der sich der Bedeckungsgrad berechnen lässt. Im zweiten Analyseschritt werden den Objekten (hier Getreideblätter) Eigenschaften zugewiesen, die aus dem Bild ermittelt werden können. Hier eine Farbklassifikation).

5 3D Datenanalyse auf Feldebene

Die Analyse von 3D Daten auf Feldebene muss im Gegensatz zur 3D Vermessung von Einzelpflanzen im Labor auf deutlich niedriger aufgelösten Daten geschehen. Je nach eingesetzter Scantechnik können Einzelpflanzen in geschlossenen Pflanzenbeständen nicht mehr detektiert werden. Es sind somit nur Aussagen über den gesamten Bestand bzw. Teile des Bestandes möglich. Eine erste Anwendung ist die sogenannte Höhenkarte eines Feldes. Dazu ist ein 3D Scan des Feldes ohne Pflanzen nötig, um die sogenannte Referenzkarte des Bodens (ground truth) zu extrahieren. Spätere Scans benutzen diese Karte um das tatsächliche Höhenwachstum aus den gescannten Höhen abzuleiten. In **Abbildung 3** ist eine Höhenkarte für zwei unterschiedliche, künstlich erzeugte 3D Feldpunktwolken gezeigt. Neben der reinen Punktwolke (A und D) sind Höhenkarten eingefärbt von grün (niedrig) bis rot (hoch) in 3D (B,E) und 2D (C,F) gezeigt. Der zweite Datensatz stellt durch eine Skalierung der Höhe eine Beobachtung zu einem späteren Zeitpunkt dar.

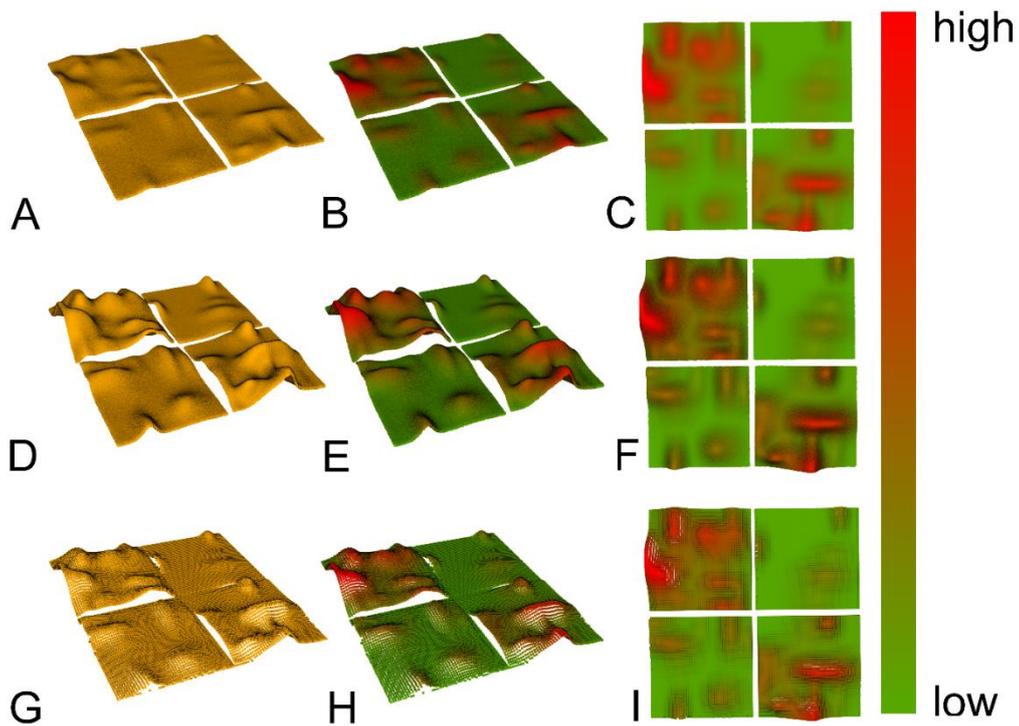


Abbildung 3: 3D Datenanalyse auf Feldebene ermöglicht die Beschreibung flächiger Parameter. Mittels beispielhaft generierter Felddaten sind hier 3D Punktwolken eines frühen Datums (A) mit der dazu gehörigen Höhenkarte als eingefärbte 3D Punktwolke (B) und als 2D Karte (C) dargestellt. Ein späteres Datum mit deutlich ausgeprägter Struktur ist auf gleiche Weise dargestellt (D-F). Die Differenz der beiden Punktwolken (G) beschreibt das Wachstum. Dieses ist anhand einer Wachstumskarte mit gleicher Farbcodierung in 3D (H) und 2D (I) dargestellt.

Karten mit Informationen über das Wachstum zwischen zwei Daten sind deutlich schwieriger zu generieren. Beim Laserscanning kann nicht davon ausgegangen werden, dass zu einem bestimmten Höhenwert Z_1 auf einer XY Koordinate im ersten Scan ein Höhenwert Z_2 in einem zweiten Scan mit der gleichen XY Koordinate verfügbar ist. Somit muss in der zweiten Punktwolke der Höhenwert Z_2 gesucht werden, dessen XY Koordinate den kleinsten Abstand zur XY Koordinate des Z_1 Höhenwertes besitzt. In der Praxis wird dies gelöst, indem ein 2D Raster mit uniformen Punktabständen generiert wird. Beide Scanpunktwolken werden in die Ebene projiziert. Nun wird für jeden 2D Rasterpunkt die nächste XY Koordinate in den projizierten Punktwolken gesucht und dort die ursprüngliche Höhe abgegriffen. Jedem Rasterpunkt wird nun die Differenz der Höheninformation der beiden Scanpunktwolken zugeordnet. Daraus ergibt sich die Differenzpunktwolke, die für die Erstellung der Wachstumskarten notwendig ist. Das Ergebnis ist in **Abbildung 3** anhand der Differenzpunktwolke (G), der 3D- (H) und der 2D-Wachstumskarte (I) gezeigt. Der dazugehörige Algorithmus ist in **Abbildung 4** veranschaulicht.

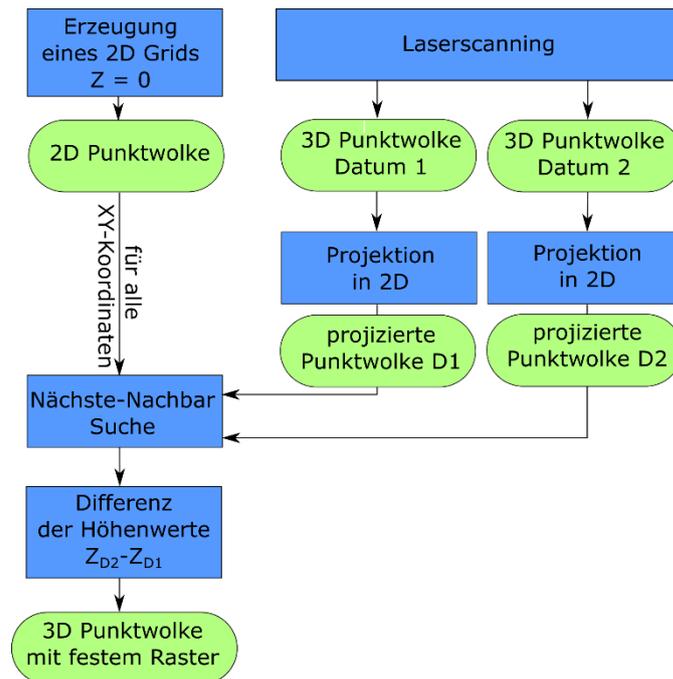


Abbildung 4: Datenflussdiagramm zur Berechnung einer Wachstumskarte. Als Eingabe dienen hier die 3D Punktwolken aus Laserscans eines Feldes zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. In den gleichen Abmessungen wird eine uniforme 2D Punktwolke generiert, die dritte Dimension dieser Punktwolke berechnet sich aus der Differenz der beiden Höhen der entsprechenden XY Koordinate in den beiden Eingabepunktwolken.

6 Ausblick

3D Laserscanning ermöglicht neue Möglichkeiten, um Wachstumskinetiken auf Feldebene detailliert beschreiben zu können. Das vorgestellte LemnaTec Field-System ermöglicht eine genaue 3D Vermessung der Bestandsoberfläche und die Kombination dieser Höhenkarten mit anderen gemessenen Kenngrößen wie Chlorophyllgehalt oder Temperatur. Durch die Möglichkeit der Nutzung mehrerer Sensoren besteht die Möglichkeit der Kombination der Sensoren, um bisher unbekannte Zusammenhänge aufzudecken und multidimensionale Feldkarten zu generieren.

Literaturverzeichnis

- BEHMANN J., MAHLEIN A.-K., PAULUS S., OERKE E.-C. KUHLMANN H., PLÜMER L. (2014):** Generation and application of hyperspectral 3D plant models. Workshop Computer Vision Problems in Plant Phenotyping (CVPPP) in conjunction with 13th European Conference on Computer Vision ECCV at Zürich
- BENDIG J., BOLTEN A., BENNERTZ S., BROSCHEIT J., EICHFUSS S., BARETH G. (2014):** Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. Remote Sens 6(11)
- DORNBUSCH T., MICHAUD O., XENARIOS I., FRANKHAUSER C. (2014):** Differentially Phased Leaf Growth and Movements in Arabidopsis Depend on Coordinated Circadian and Light Regulation. The Plant Cell 10/2014
- HARTMANN A., CZAUDERNA T., HOFFMANN R., STEIN N., SCHREIBER F. (2011):** HTPPheno: An image analysis pipeline for high-throughput plant imaging. BMC Bioinformatics 12:148

- KARCHER E.K., RICHARDSON M.D. (2003):** Quantifying Turfgrass Color Using Digital Image Analysis, *CROP SCIENCE* 43, 943-951
- OMASA K., HOSOI F., KONISHI A. (2007):** 3-D LiDAR imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *J. Exp. Bot.* 2007, 58, 881–898
- PAULUS S., SCHUMANN H., KUHLMANN H., LÉON J. (2014):** High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Biosystems Engineering* 121:1-11
- PAULUS S., DUPUIS J., RIEDEL S., KUHLMANN H. (2014b):** Automated Analysis of Barley Organs Using 3D Laser Scanning: An Approach for High Throughput Phenotyping. *Sensors* 14(7) 12670-12686
- RAY D.K., RAMANKUTTY N., MUELLER N.D., WEST P.C., FOLEY J.A. (2012):** Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat. Commun.* 3, 1293
- RAY D.K., MUELLER N.D., WEST P.C., FOLEY J.A. (2013):** Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE* 8
- TILLY N., HOFFMEISTER D., CAO Q., HUANG S., LENZ-WIEDEMANN V., MIAO Y., BARETH G. (2013):** Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *J. Appl. Remote Sens.* 8(1)
- TILMAN D., BALZER C., HILL J., BEFORT B.L. (2011):** Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108, 20260–20264

Robuste und strukturerhaltende Bildentrauschung via Medianfilterung und Bildsegmentierung

Robust and structure-preserving image denoising via median filtering and image segmentation

Andreas Kleefeld ¹, Maik Veste ²

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg, Fakultät für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik, Platz der Deutschen Einheit 1, 03046 Cottbus
Email: kleefeld@tu-cottbus.de

² Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg, Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03046 Cottbus
Email: maik.veste@me.com

Zusammenfassung: Ein Medianfilter ist ein Werkzeug, das benutzt werden kann, um Bilder zu entrauschen. Allerdings verschwimmen vorhandene Strukturen, und eine gute Bildsegmentierung gestaltet sich schwierig. Daher wird hier ein Medianfilteralgorithmus vorgestellt, der in der Lage ist, Bilder zu entrauschen und gleichzeitig vorhandene Strukturen beizubehalten. Wir zeigen die Anwendbarkeit dieser Methode auf Bilder, die durch ein automatisches Minirhizotrons system aufgenommen worden sind. Dieses dient zur zerstörungsfreien Observierung von Wurzelwachstum. Die verbesserten Bilder werden dann zur Bildsegmentierung benutzt, um automatisch die Wurzeln in den Bildern zu entdecken.

Deskriptoren: Medianfilter, Bildsegmentierung, automatisches Minirhizotrons system

Abstract: *Median filtering is an easy tool to denoise images. However, structures get blurred and good image segmentation gets difficult. Therefore, a median filtering algorithm is provided that denoises an image and, at the same time, preserves structures. We show the applicability of the method to images that were acquired through the automated minirhizotron system – a suitable tool to observe fine root growth non-destructively. The enhanced images can then be used for image segmentation to detect roots automatically.*

Keywords: *median filtering, image segmentation, automated minirhizotron system*

1 Einleitung und Motivation

In vielen Anwendungen sind aufgenommene Bilder aufgrund verschiedener Bedingungen verrauscht. Die Verwendung eines Medianfilters ist eine gut verstandene Methode, um Grauwertbilder zu entrauschen. Das Problem dabei allerdings ist, dass bei Verwendung eines festen Strukturelements kleinere eventuell wichtige Strukturen verschwinden, und dass zum Beispiel Ecken abgerundet werden. Abhilfe schafft hier die Verwendung eines adaptiven Strukturelements, kurz *Amöbe* genannt. Eine grafische Darstellung ist in **Abbildung 1** zu finden.

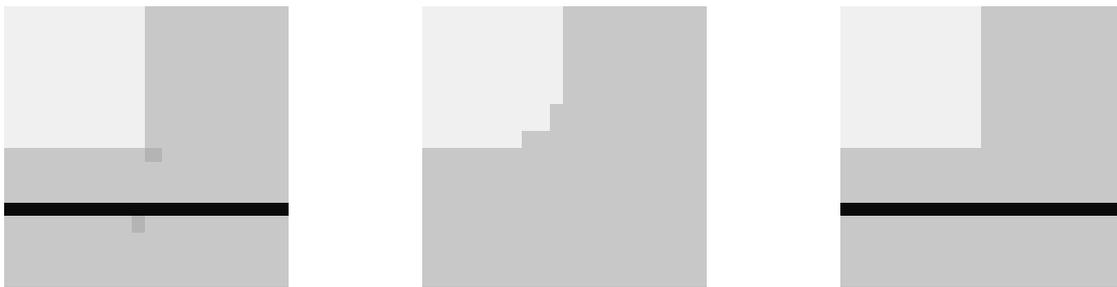


Abbildung 1: Links: Original Grauwertbild beinhaltet unter anderem eine schwarze Linie und zwei verrauschte Pixel. Mitte: Medianfilter mit festem Strukturelement angewendet auf das Originalbild. Rechts: Medianfilter mit adaptivem Strukturelement angewendet auf das Originalbild.

Für die Bilderfassung sind in den vergangenen Jahren bereits verschiedene manuelle und automatische Systeme zur Erfassung des Wurzelsystems - so genannte Minirhizotrone - entwickelt worden (VESTE 2012). Ein Minirhizotronsystm basiert auf einer CCD-Kamera, die entlang einer Glasröhre vollautomatisch Bilder aufzeichnet und diese zu einem Gesamtbild zusammensetzt (VESTE *et al.* 2013). Ein grundsätzliches Problem für die Anwendung von optischen Messverfahren zur Erfassung von Wurzeln im Boden sind die umfangreichen Bilddaten, die eine automatische Wurzelerkennung und Bildauswertung notwendig machen würde, was sich bislang als extrem schwierig herausstellte (ERZ *et al.* 2005, VESTE 2010). Wegen technischer Schwierigkeiten bei der Aufnahme ist vielfach auch eine Bildverbesserung notwendig (HARMS *et al.* 2014).

In diesem Beitrag wird erklärt, wie die Erweiterung des Medianfilters in Kombination mit *Amöben* für Farbbilder, die von einer Farbkamera des automatischen Minirhizotronsystms (VESTE *et al.* 2013) stammen, verwendet werden kann.

2 Adaptiver Medianfilter für Farbbilder

Zunächst wird vorgestellt, wie ein Farbbild der Größe $n \times m$, in ein Matrixfeld der Größe $n \times m$ umgewandelt wird. Jeder Rot-Grün-Blau Pixel eines Farbbildes wird in vier Schritten in eine symmetrische 2×2 Matrix umgewandelt. Im ersten Schritt wird die RGB-Information in HCL umgewandelt, wobei H = hue, C = chroma und L = lightness ist. Im zweiten Schritt wird die Helligkeit modifiziert. Im dritten Schritt werden die zylindrischen

Koordinaten (C ist radiale Komponente, $2\pi H$ ist Winkelkoordinate und modifiziertes L ist axiale Komponente) in rechtwinklige Koordinaten umgewandelt. Im letzten Schritt werden die rechtwinkligen Koordinaten in eine 2×2 symmetrische Matrix umgewandelt. Für die detaillierten Formeln verweisen wir auf den Artikel von BURGETH & KLEEFELD 2014. Die verwendete Abbildung ist bijektiv und die Umkehrabbildung kann ebenfalls leicht durchgeführt werden.

Als Nächstes wird erklärt, wie ein adaptives Strukturelement erzeugt wird (KLEEFELD *et al.* 2015). In **Abbildung 2** werden ein festes Strukturelement (ein diskreter Kreis mit Radius 3) und zusätzlich ein adaptives Strukturelement (kurz *Amöbe*), das sich in einem diskreten Kreis mit Radius 3 befindet, dargestellt. Zu sehen ist, dass die *Amöbe* in der Lage ist, bestimmte Strukturen auszuschließen.



Abbildung 2: Links: Diskretes kreisförmiges Strukturelement mit Radius 3. Rechts: Adaptives Strukturelement (kurz *Amöbe*), das in der Lage ist, bestimmte Strukturen auszuschließen.

Die Konstruktion der *Amöbe* besteht aus drei Schritten. Es sei f_i der Grauwert des i -ten Pixels eines Bildes mit den Koordinaten (x_i, y_i) . Ferner sei der maximalmögliche Radius ρ , das Zentrum (x_{i_0}, y_{i_0}) im Pixel i_0 und der Parameter σ vorgegeben. Im ersten Schritt werden alle Pixel i^* betrachtet, die im vorgegebenen Kreis mit Zentrum (x_{i_0}, y_{i_0}) und Radius ρ liegen. Im zweiten Schritt werden alle vorgewählten Pixel selektiert, und es werden Pfade der Form $(i_0, i_1, \dots, i_k \equiv i^*)$, die i_0 mit i^* verbinden, betrachtet. Erlaubte Pixel sind hierbei nur die direkten Nachbarn, um den Pfad zu beschreiben. Im letzten Schritt wird der kürzeste Pfad P unter allen möglichen Pfaden bestimmt, wobei der folgende Amöbenabstand verwendet wird: $L(P) = \sum_{m=0}^{k-1} 1 + \sigma \sum_{m=0}^{k-1} |f_{i_{m+1}} - f_{i_m}|$. Falls gilt $L(P) \leq \rho$, dann gehört der Pixel i^* zur *Amöbe*. Die drei Schritte und das Ergebnis sind in dem folgenden **Abbildung 3** dargestellt.

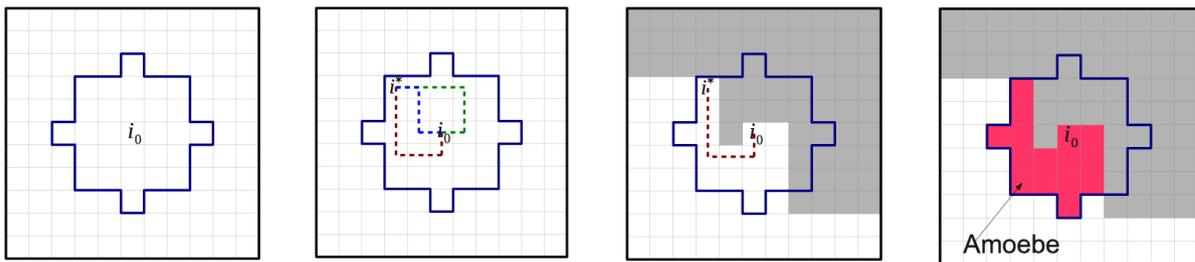


Abbildung 3: Links: Vorselektierte Pixel innerhalb des diskreten Kreises mit Radius 3 zentriert um i_0 . Mitte links: Mögliche Pfade zum Pixel i^* . Mitte rechts: Kürzester Pfad unter Verwendung des Amöbenabstands. Rechts: Darstellung des adaptiven Strukturelements (kurz *Amöbe*).

Die Konstruktion einer *Amöbe* für Farbbilder läuft wie folgt ab: Zunächst wird das Farbbild in ein Matrixfeld transformiert. Wir nennen F_i die symmetrische 2×2 Matrix mit den Koordinaten (x_i, y_i) . Wir verwenden nun die Frobeniusnorm $\|\cdot\|_F$ in der Definition von $L(P)$

$$\text{und erhalten somit } L(P) = \sum_{m=0}^{k-1} 1 + \sigma \sum_{m=0}^{k-1} \|f_{i_{m+1}} - f_{i_m}\|_F.$$

Kommen wir nun zur Berechnung des Matrixmedians. Hierzu seien A_1, A_2, \dots, A_n symmetrische 2×2 Matrizen, die man durch die Konstruktion einer *Amöbe* erhält. Der Matrixmedian berechnet sich durch die Minimierung des konvexen Funktionals $\sum_{i=1}^n \|X - A_i\|_F$. Da die vorgegebenen Matrizen Punkte im dreidimensionalen Raum repräsentieren, die in einem konvexen Doppelkegel liegen, ist der Median in diesem konvexen Gebilde enthalten.

Abschließend wird nun erklärt, wie der Amöbenmedianfilter (AMF) funktioniert. Für ein vorgegebenes Farbbild wird zunächst das zugehörige Matrixfeld berechnet. Dann wird für jede Matrix die zugehörige *Amöbe* berechnet. Von den Matrizen, die zur *Amöbe* gehören, wird der Matrixmedian berechnet und das Ergebnis in einem neuen Matrixfeld abgespeichert. Diese Methode kann auch mehrmals angewendet werden, so dass man eine Folge von Matrixfeldern erhält. Man spricht dann von einem iterativen Amöbenmedianfilter (IAMF). Schlussendlich wird das letzte Matrixfeld wieder in ein Farbbild umgewandelt.

3 Vorläufige Ergebnisse

Im Folgenden betrachten wir ein farbiges Teilbild (TB) eines kompletten Wurzelbildes (siehe **Abbildung 4** für einen Ausschnitt), um die Effekte leichtverständlich zu erläutern.



Abbildung 4: Teil eines kompletten Wurzelwerkes aufgenommen durch das automatisierte Minirhizotrons system.

Zunächst zeigen wir den Effekt des Medianfilters mit festem kreisförmigen Strukturelement mit Radius 3, angewendet auf das farbiges Teilbild der Größe 236×222 (siehe **Abbildung 5** links oben und links unten). Zu sehen ist, dass das Bild entrauscht wird, aber kleinere Wurzeln verschwinden (siehe **Abbildung 5** Mitte oben). Die Verwendung eines adaptiven Medianfilters mit $\sigma = 5$ und $\rho = 5$ entrauscht das Bild, und es werden gleichzeitig Strukturen beibehalten (siehe **Abbildung 5** rechts oben). Zusätzlich zeigen wir den Effekt, wenn wir den Filter in beiden Fällen iterativ dreimal anwenden (siehe **Abbildung 5** Mitte unten und rechts unten). Zu sehen ist, dass für ein festes Strukturelement die Strukturen verschwimmen, wohingegen bei einem adaptiven Strukturelement die Strukturen erhalten bleiben. Mehrmaliges Anwenden des adaptiven Medianfilters simplifiziert die Strukturen erheblich.



Abbildung 5: Links oben: Originalbild. Mitte oben: Medianfilter mit festem Strukturelement. Rechts oben: Medianfilter mit adaptiven Strukturelement. Links unten: Originalbild. Mitte unten: 3-mal Medianfilter mit festem Strukturelement. Rechts unten: 3-mal Medianfilter mit adaptivem Strukturelement.

Um den Kontrast zu erhöhen, wenden wir als Nächstes einen (matrixwertigen) Shockfilter an (siehe auch BURGETH & KLEEFELD 2014). Die Idee hierbei ist, Dilatation in der Nähe eines Maximums und Erosion in der Nähe eines Minimums zu verwenden. Die Entscheidung basiert hierbei auf dem morphologischen Laplaceoperator. In **Abbildung 6** ist die Anwendung des Shockfilters für ein festes 3×3 Strukturelement auf die Bilder aus **Abbildung 5** (zweite und dritte Spalte) zu sehen. Eine Verbesserung des Kontrastes ist zu erkennen.



Abbildung 6: Shockfilter mit festem 3 x 3 Strukturelement angewendet auf die mit dem Median gefilterten Bilder. Links: Medianfilter mit festem Strukturelement. Mitte links: Medianfilter mit adaptiven Strukturelement. Mitte rechts: 3-mal Medianfilter mit festem Strukturelement. Rechts: 3-mal Medianfilter mit adaptiven Strukturelement.

Im letzten Schritt verwenden wir die verbesserten und vereinfachten Bilder aus **Abbildung 5** und **Abbildung 6** und wenden darauf nun die Bildsegmentierungsmethode von Otsu (OTSU 1979) auf die Helligkeitskomponente L der Bilder an. Die erkannten Segmente werden hier leicht blau dargestellt und über das Originalbild gezeichnet. Nun ist es ebenfalls möglich zu bestimmen, wie viele zusammenhängende Objekte gefunden werden und wie groß diese sind.

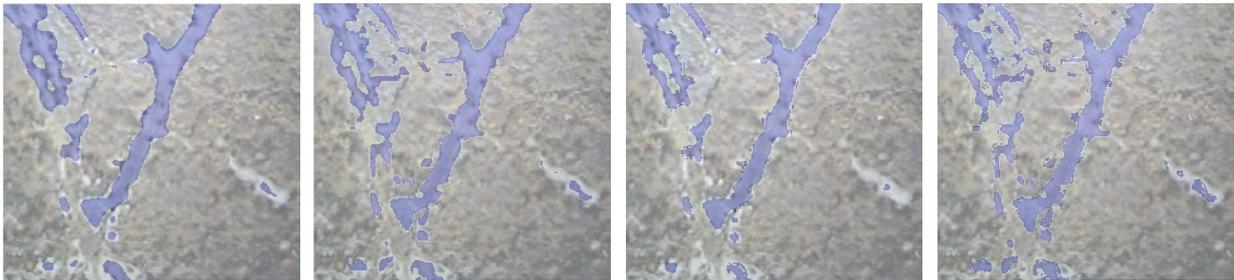


Abbildung 7: Links: Medianfilter unter Verwendung eines festen Strukturelements. Mitte links: Medianfilter unter Verwendung eines adaptiven Strukturelements. Mitte rechts: Medianfilter unter Verwendung eines festen Strukturelements und Anwendung von einem Shockfilter. Rechts: Medianfilter unter Verwendung eines adaptiven Strukturelements und Anwendung von einem Shockfilter.

Wir sehen, dass anhand der ersten beiden Bilder in **Abbildung 7** bereits ein Unterschied zwischen der Verwendung eines festen und adaptiven Strukturelements besteht. Es werden 15 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 6857 erkannt, wohingegen im zweiten Fall 35 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 7407 erkannt werden. Auch visuell kann bestätigt werden, dass die Verwendung eines adaptiven Strukturelements von Vorteil ist. Auf die zwei Bilder wurde nun der Shockfilter angewendet. Hier werden insgesamt 32 und 62 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 5977 und 7439 berechnet. Wiederum ist ersichtlich, dass die adaptive Variante bessere Ergebnisse liefert. Interessanterweise ist die Anzahl der Gesamtpixelgröße bei beiden adaptiven Varianten nahezu identisch obwohl mehr Komponenten gefunden wurden. Visuell ist das Ergebnis unter Anwendung

des Shockfilters besser, allerdings gibt es viele kleine Komponenten.

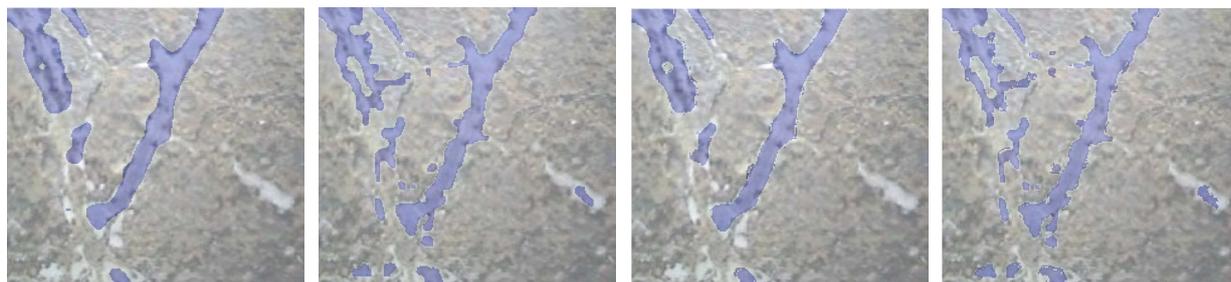


Abbildung 8: Links: 3-mal Medianfilter unter Verwendung eines festen Strukturelements. Mitte links: 3-mal Medianfilter unter Verwendung eines adaptiven Strukturelements. Mitte rechts: 3-mal Medianfilter unter Verwendung eines festen Strukturelements und Anwendung von einem Shockfilter. Rechts: 3-mal Medianfilter unter Verwendung eines adaptiven Strukturelements und Anwendung von einem Shockfilter.

Ähnliche Ergebnisse bekommt man, wenn man den Medianfilter iterativ 3-mal anwendet (siehe **Abbildung 8**). Für ein festes Strukturelement bekommt man 6 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 6502. Visuell ist zu sehen, dass Wurzeln erstens nicht erkannt worden sind und zweitens Übersegmentierung stattgefunden hat. Für den adaptiven Fall bekommt man 15 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 7185. Das Ergebnis ist visuell besser als das vorherige. Nun wird noch zusätzlich der Shockfilter angewendet. Wir bekommen sowohl für den nicht-adaptiven als auch für den adaptiven Fall 25 zusammenhängende Strukturen mit einer Gesamtpixelgröße von 6052 und 7162. Auch hier ist der adaptive Fall deutlich besser als der nicht-adaptive Fall. Insgesamt zeigt sich, dass die Verwendung adaptiver Strukturelemente für Farbbilder deutlich bessere Ergebnisse liefert.

Weitere Verbesserungen wie zum Beispiel in der Entfernung von ungleichmäßiger Beleuchtung stehen noch aus.

Danksagung

Wir danken Herrn Prof. Bader für die Herstellung des Kontaktes der Autoren. Großen Dank an Gerhard Kast von UP – Umweltanalytische Produkte GmbH, der uns freundlicherweise Testbilder zur Verfügung stellte.

Literaturverzeichnis

BURGETH B., KLEEFELD A. (2014): An approach to color-morphology based on Einstein addition and Loewner order. *Pattern Recognition Letters* 47: 29–39

ERZ G., VESTE M., ANLAUF H., BRECKLE S.-W., POSCH S. (2005): A region and contour based technique for automatic detection of roots of tomatoes in minirhizotron images. *Applied Botany and Food Quality* 79: 83–88

- HARMS R., SCHÄFER H.-P., KAST G., VESTE M. (2014):** Optimierung der Bildauswertung von Farbbildern aus Minirhizotronen zur Wurzelbeobachtung. Bornimer Agrartechnische Berichte, in diesem Band
- KLEEFELD A., BREUß M., WELK M., BURGETH B. (2015):** Adaptive filters for color images: median filtering and its extensions. Computational Color Imaging Workshop, im Druck
- OTSU N. (1979):** A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 9 (1): 62–66
- VESTE M. (2010):** Anwendung automatischer Verfahren zur Erfassung von Wurzeln in Minirhizotron-Bildern. Bornimer Agrartechnische Berichte 73: 72–78
- VESTE M. (2012):** Anwendung von optischen Messsystemen zur nicht-destruktiven Erfassung von Wurzeln im Boden. Bornimer Agrartechnische Berichte 78: 81–89
- VESTE M., SCHÄFER H.-P., HARMS J., KAST G. (2013):** Ein neues computergesteuertes Minirhizotron-System zur Erfassung von Wurzeln. Bornimer Agrartechnische Berichte 81: 295–301

Unterscheidung von Pflanzenarten anhand ihres Spektralprofils mittels einer Spektralen Datenbank am Beispiel von Beifußblättriger Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia* L.)

A spectral database for the discrimination of plant species at the example of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.)

Joachim Intreß, Martin Geyer, Karl-Heinz Dammer

*Leibniz Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim, Max-Eyth-Allee 100,
14469 Potsdam, Germany
Email: jintress@atb-potsdam.de*

Zusammenfassung: *Ambrosia* (*Artemisia artemisiifolia* L.) stellt zunehmend eine Gefahr für Allergiker darstellt. Als Ruderalpflanze wächst sie besonders auf gestörten Böden, so beispielsweise an Straßenrändern. Dort sollte sie noch vor der Blüte erkannt und beseitigt werden, um den Pollenflug zu unterbinden.

Die Unterscheidung von Pflanzen allein auf Grundlage ihrer Spektralprofile stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Die Spektralprofile artverwandter Pflanzen sind sich sehr ähnlich und sie ändern sich im Laufe des Pflanzenwachstums relativ stark. Zusätzlich haben Standortbedingungen und Umweltfaktoren einen großen Einfluss auf diese Spektralprofile. Hinzu kommt eine recht große Streuung innerhalb jeder einzelnen Pflanze, ja selbst innerhalb eines einzelnen Blatts einer Pflanze.

All dies erzwingt eine statistische Auswertung über eine größere Anzahl von Pflanzen unter Einbeziehung der Streuung. Werden hierbei Standortfaktoren, Umweltbedingungen und Daten der Bildauswertung nicht mit einbezogen, ist keine Unterscheidung auf dieser Grundlage möglich.

Der Aufbau einer spektralen Datenbank erlaubt den effizienten Vergleich der einzelnen Pflanzenarten. In dieser Datenbank werden die Spektralprofile der gemessenen Pflanzen zusammen mit allen verfügbaren Zusatzdaten zu Standort, aktuellen Umweltbedingungen und weitere relevante Parameter abgespeichert. Eine am ATB aufgebaute Datenbank, am Beispiel der Erkennung von *Ambrosia* beschränkt sich gegenwärtig auf die Spektraldaten und die zugehörigen Metadaten.

Ambrosia- und *Beifuß*pflanzen (*Artemisia vulgaris*) wurden in den Jahren 2010 bis 2014 hyperspektral gescannt, typische Pflanzenregionen markiert (ROI) und in der Datenbank abgelegt. Die Datenbank ermöglicht es, die gemessenen Spektralprofile anhand frei bzw. spezifisch wählbarer Kriterien auf Basis der Metadaten zu gruppieren. Dadurch wird der Vergleich einer relativ großen Anzahl von Einzelmessungen möglich. Ange-

wendet auf Ambrosia/Beifuß – Messreihen aus dem Jahr 2012 - zeigte sich, dass eine Klassifizierung beider Pflanzenarten unter Einbeziehung aller durchgeführten Messungen nicht möglich war. Wurden jedoch Zusatzdaten wie Wachstumsstadium und Lichtverhältnisse am Pflanzenstandort mit in die Klassifizierung einbezogen, konnte die Klassifizierbarkeit beider Pflanzenarten deutlich erhöht werden.

Deskriptoren: Pflanzenerkennung, bildgebende Spektroskopie, Datenbank

Abstract: *Ragweed (Ambrosia artemisiifolia L.) is a ruderal species. Its pollen is notorious for causing allergic reactions in humans with a high allergenic potential. Therefore the plants should be eliminated as early as possible in the surroundings.*

The discrimination of plants, especially of congeneric plants, only on the basis of their reflectance spectra is a big challenge because the spectra are very similar. Additionally several other impacts like season, physiological state of growth, location and environmental conditions affect the spectra. The variance within a single plant or within a single leaf is also important. These effects constrain a statistical evaluation on the basis of a big number of plants. As supplemental information location factors and environmental conditions should be integrated in this evaluation. The development of a spectral database makes it possible to compare the single plant species very efficiently. The measured spectra of the plants together with available and associated metadata will be saved in the described database.

In an example ragweed and mugwort (Artemisia vulgaris L.) were scanned by a hyperspectral camera in the years 2010 to 2014. Regions of interest (ROI) were marked manually and then saved in the database. The database enables to group measured spectra on basis of her metadata. Thereby it is possible to compare a lot of single measurements very rapidly. Investigations with measured values of ragweed and mugwort from 2012 were carried out. A discrimination of both plant species was not possible without taking into consideration additional criteria. First after taking into consideration such criteria like growing state and location the classification could be clearly improved.

Keywords: *plant identification, imaging spectroscopy, database*

Unterscheidung von Pflanzenarten anhand ihres Spektralprofils mittels einer Spektralen Datenbank

Ambrosia (*Artemisia artemisiifolia* L.) ist eine aus Nordamerika eingeschleppte Pflanze, die hierzulande zunehmend eine Gefahr für Allergiker darstellt. Als Ruderalpflanze wächst sie besonders auf gestörten Böden, so beispielsweise an Straßenrändern, in Kiesgruben, an Bahndämmen, auf Baustellen und Schutthalden. Die häufigsten Wuchsorte sind aber Gärten. Um das Risiko für Allergiker zu vermindern, sollten Ambrosiapflanzen daher möglichst vor der Blüte beseitigt werden. Dies verlangt jedoch,

dass sie mit Sensoren erkannt und anschließend möglichst vollautomatisch beseitigt werden (DAMMER *et al.* 2013 und 2014).

Die Unterscheidung von Pflanzenarten auf der Grundlage ihrer Spektralprofile ist jedoch eine große Herausforderung. Spektralprofile artverwandter Pflanzen sind sich häufig nicht nur sehr ähnlich, sie sind auch im Laufe der Wachstumsperiode relativ starken Änderungen unterworfen. Standortbedingungen und Umweltfaktoren haben auf diese Änderungen ebenfalls einen großen Einfluss. Weiterhin sind die Spektralprofile innerhalb einer einzelnen Pflanze (Gewebeklassen: Blatt, Stiel, Blüte) nicht homogen sondern streuen, selbst noch innerhalb einer Klasse relativ stark.

In einem Versuch im Jahr 2012 wurden Ambrosia (*Artemisia artemisiifolia* L.)- und Beifußpflanzen (*Artemisia vulgaris* L.) in Pflanztöpfen ausgesät und einmal wöchentlich mit einer Hyperspektralkamera im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 1000 nm an 12 Terminen, im Abstand von je einer Woche aufgenommen. Jeweils die Hälfte der ausgesäten Pflanzen wuchs hierbei an einem sonnigen bzw. schattigen Standort. **Abbildung 1** zeigt beispielhaft die mittleren Spektralprofile der Gewebeklasse Blattoberseite der auf drei Ambrosiapflanzen markierten, in der ersten Phase subjektiv ausgewählten Regionen (ROI) vom sonnigen Standort. Im Laufe des Wachstums (zu den späteren Messterminen hin) ist eine deutliche Zunahme der Reflexion im grünen Bereich (550 nm) zu erkennen. Die Spektren der Beifußpflanzen verhalten sich ähnlich.

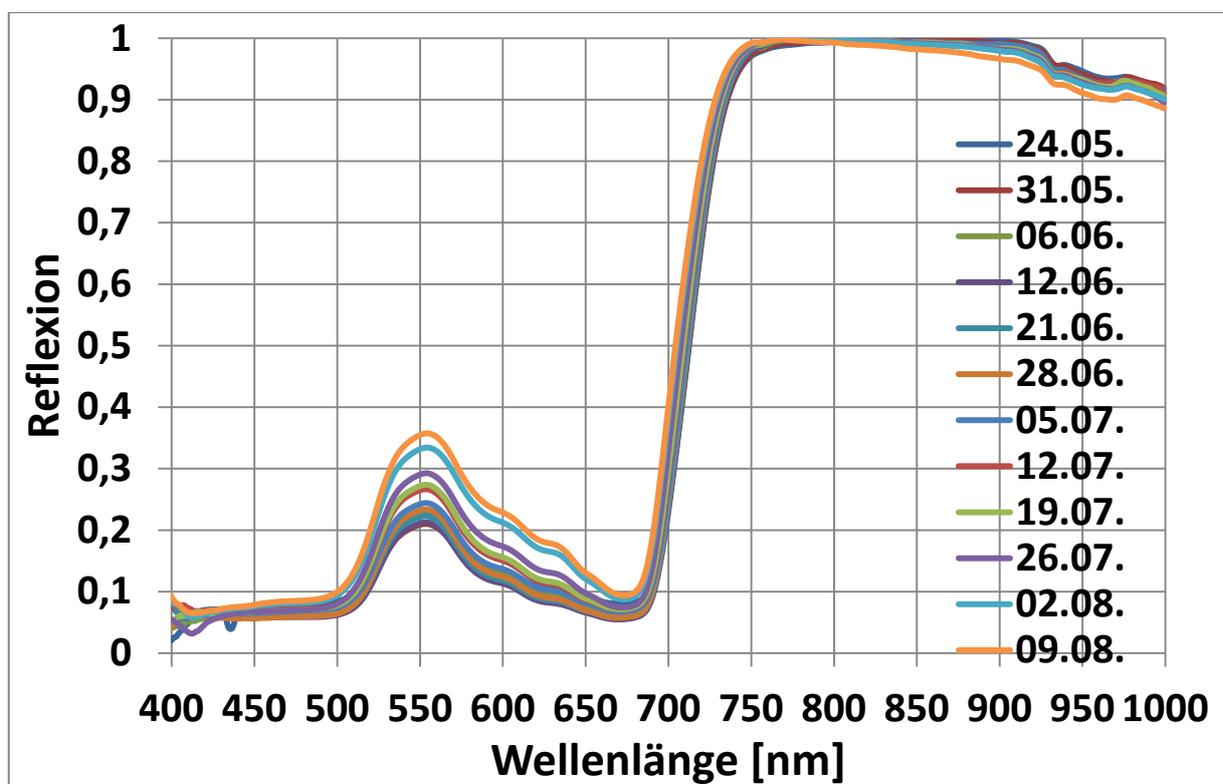


Abbildung 1: Normierte Spektralprofile der Gewebeklasse: Blattoberseite der Ambrosie (sonniger Standort) an 12 Messterminen

Die Streuung der Spektralprofile der auf den Blattoberseiten markierten ROI's ist, getrennt nach den 3 Pflanzen in **Abbildung 2** dargestellt. Exemplarisch sind hier die Reflexionswerte der beiden Wellenlängen 550 und 635 nm der am 9.08.2012 gemessenen Pflanzen ausgewählt.

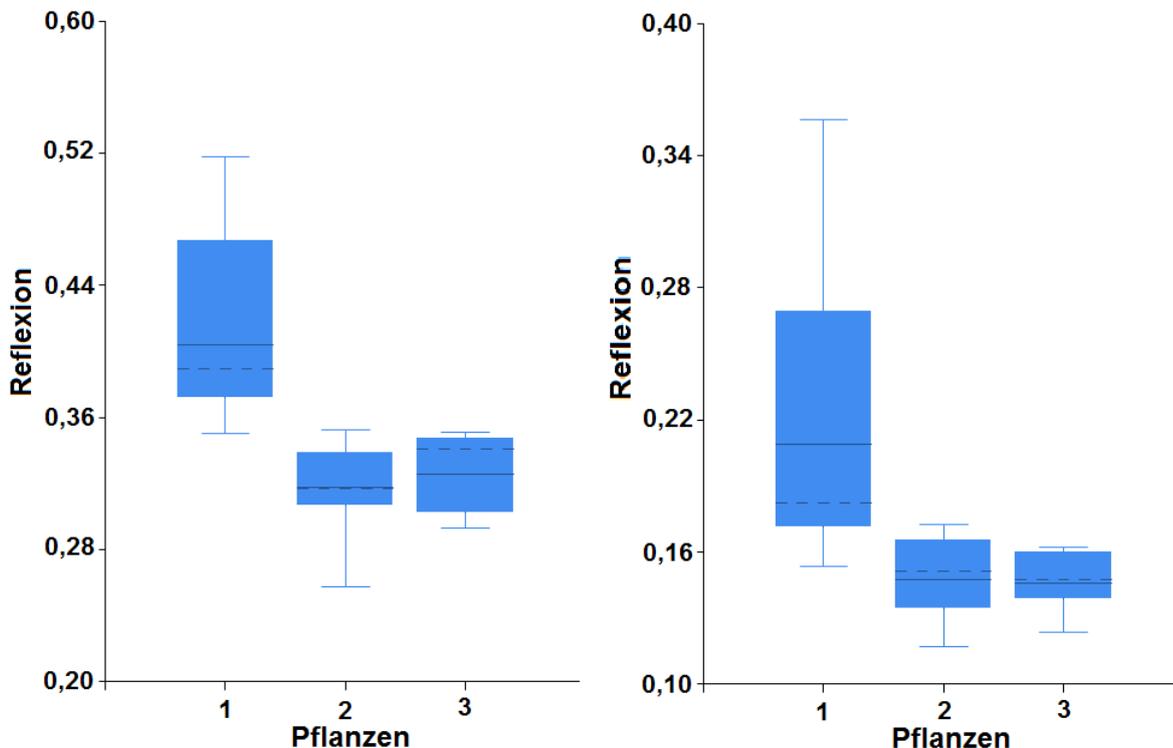


Abbildung 2: Boxplots der normierten Reflexionswerte bei 550 (links) und 635 nm (rechts) der Blattoberseite getrennt nach den 3 Pflanzen (sonniger Standort, Termin: 9.08.)

Die Diagramme lassen die relativ große Streuung erkennen und zeigen, dass ein Vergleich der Mittelwerte nur eine recht begrenzte Aussage über die Unterscheidbarkeit dieser Pflanzenarten zulässt (KNIPLING 1970).

Der Einfluss der Standortbedingungen wird in **Abbildung 3** deutlich. Hier wurden die mittleren Spektralprofile der ROI's der Gewebeklasse Blattoberseite jeweils dreier Ambrosiapflanzen an einem sonnigen und einem schattigen Standort gegenübergestellt. Die Pflanzen vom sonnigen Standort reflektieren das Licht im grünen Bereich stärker, ansonsten sind die Spektren ähnlich.

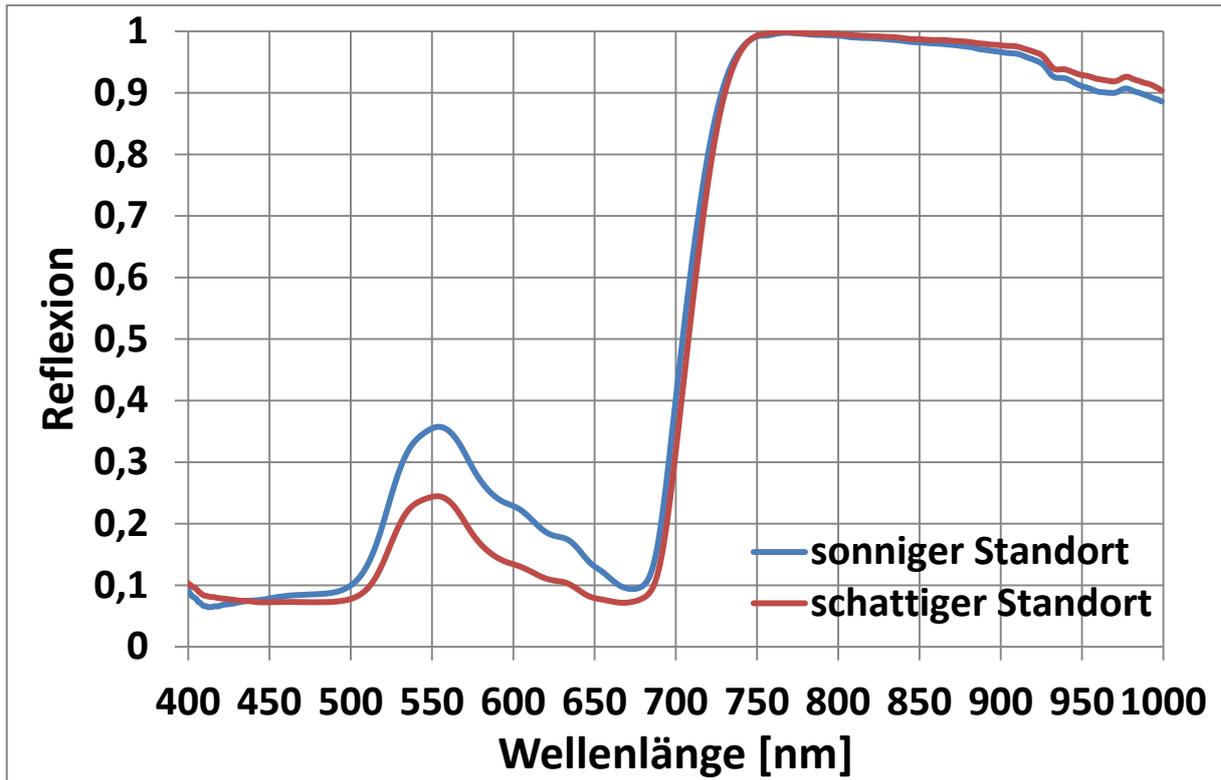


Abbildung 3: Normierte Spektralprofile (Mittelwerte der ROI's der Blattoberseiten) jeweils dreier Ambrosiapflanzen (Messtermin: 9.08.2012)

Auch wenn hier am Beispiel der Ambrosia-Spektren das typische Verhalten aller grünen Pflanzen herausgestellt wurde, sind zwischen Ambrosia und Beifuß signifikante Unterschiede erkennbar. **Abbildung 4** zeigt die mittleren Spektren der Blattoberseiten und Stiele von 3 Ambrosia und 2 Beifußpflanzen von einem sonnigen Standort.

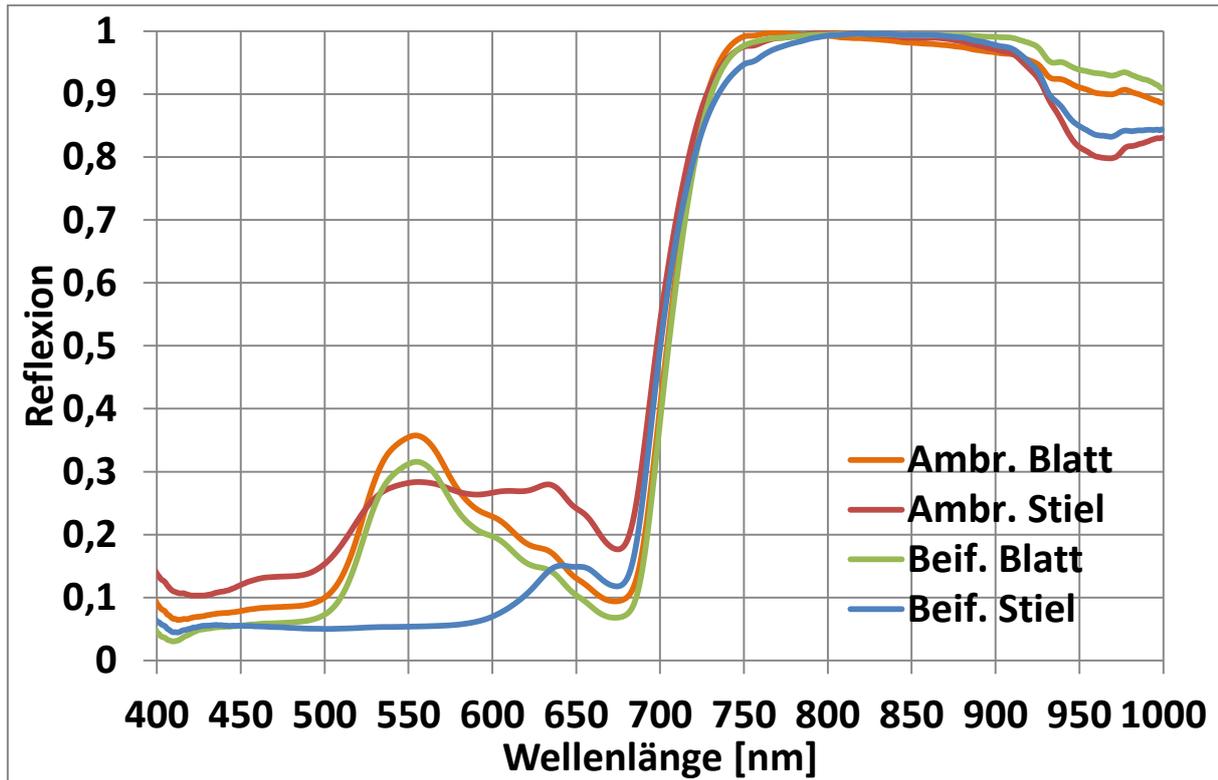


Abbildung 4: Normierte Spektralprofile (Mittelwerte der ROI's der Blattoberseiten und Stiele) jeweils dreier Ambrosia- und zweier Beifußpflanzen (Messtermin: 9.08.2012)

Diese Spektren zeigen, dass die Pflanzenstiele deutlich von den Blattoberseiten unterschieden werden können. Im Gegensatz dazu zeigt das Spektralprofil der Blätter keine signifikanten Unterschiede (LICHTENTHALER *et al.* 1996).

In **Abbildung 5** wird die Streuung der Spektralprofile für beide Pflanzen- und Gewebearten gezeigt. Die Darstellung bezieht sich wiederum beispielhaft auf die beiden Wellenlängen 550 und 635 nm. Die Unterscheidbarkeit der Stiele beider Pflanzenarten ist gut erkennbar.

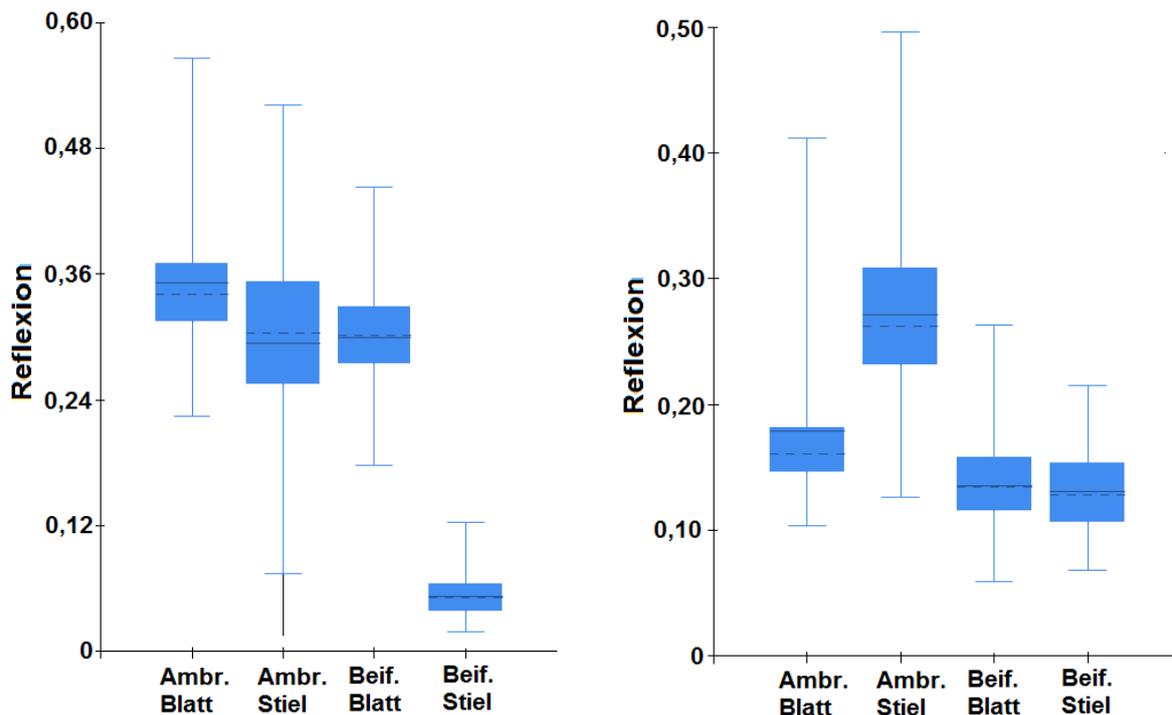


Abbildung 5: Boxplots der normierten Reflexionswerte bei 550 (links) und 635 nm (rechts) der Blattoberseiten und Stiele getrennt nach den Pflanzenarten (sonniger Standort, Termin: 9.08.)

Damit zeigt sich, dass das Spektralprofil zur Unterscheidung von Gewebeklassen und Pflanzenarten mit herangezogen werden kann. Es sind aber in jedem Fall die Randbedingungen (Metadaten) zu beachten.

Die dargestellte Problematik zeigt deutlich, dass eine Aussage über die Spektralprofile verschiedener Pflanzenarten bzw. Gewebeklassen nur auf Grundlage einer größeren Anzahl von Versuchspflanzen unter Einbeziehung der Wachstumsbedingungen getroffen werden kann.

Als Lösungsmöglichkeit wurde mit der Entwicklung eines Datenbanksystems begonnen. Hier werden neben den Hyperspektralbildern auch die Reflexionswerte der Gewebeklassen der Pflanzen sowie alle erfassbaren Zusatzdaten und Randbedingungen als Metadaten abgespeichert. Im Zuge der weiteren Entwicklung soll hier ein wissenschaftsbasiertes System entstehen, das neben den Spektraldaten auch morphologische Daten der Pflanzen und möglichst viele, erfassbare Messparameter enthält.

Die Spektralprofile der Pflanzen, getrennt nach Gewebeklassen (z.B. Blattregion, Blattober- und Blattunterseite, Stiel, Blüte, etc.) können abgerufen werden, in dem im Hyperspektralbild die entsprechenden Regionen (ROI) auf der Pflanze durch den Nutzer manuell markiert werden (siehe **Abbildung 6**). Diese markierten Regionen werden dann als 3D-Array in der Datenbank abgelegt.



Abbildung 6: Markierung von typischen ROI's auf einer Ambrosienpflanze

Der prinzipielle Aufbau der Datenbank ist in **Abbildung 7** dargestellt.

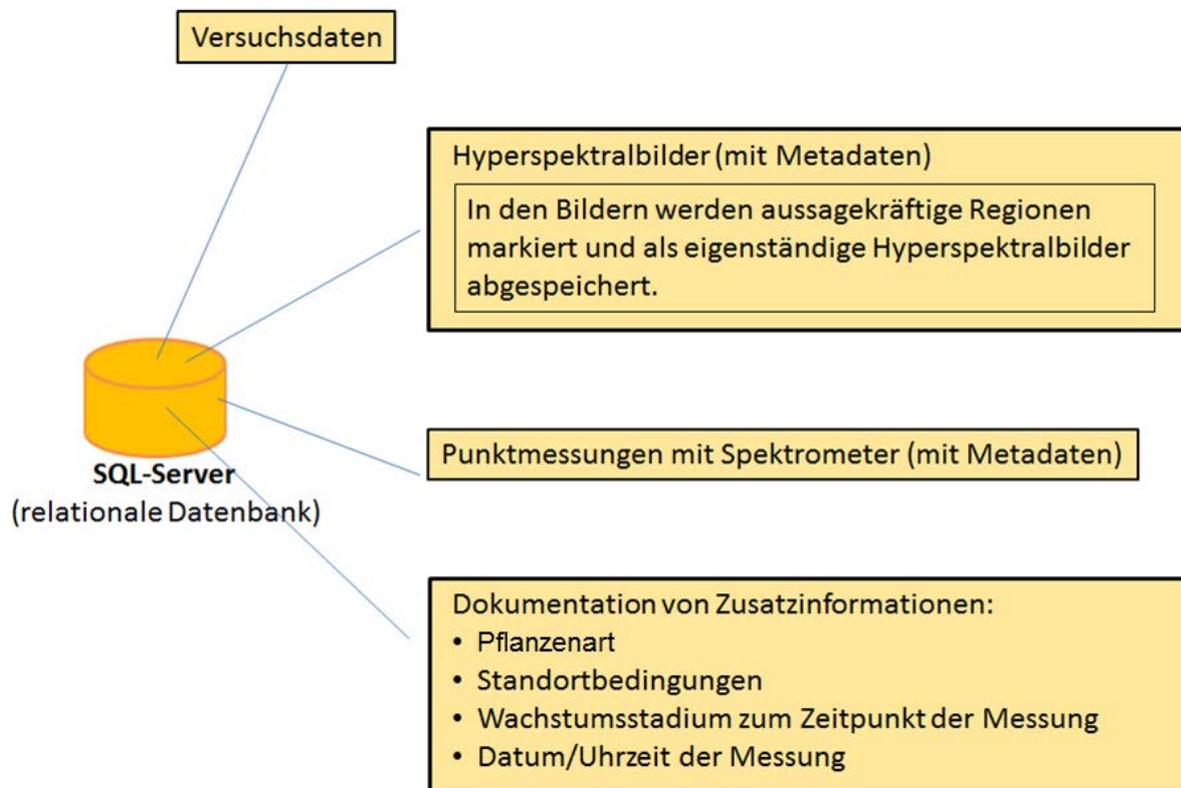


Abbildung 7: Aufbau der Datenbank.

Neben den aus den Hyperspektralaufnahmen ermittelten Reflexionswerten der Pflanzen werden gegenwärtig die folgenden Metadaten erfasst:

- Pflanzenart
- Wachstumsstadium der Pflanze zum Zeitpunkt der Messung
- Vom Nutzer auf der Pflanze markierte Region
- Standortbedingungen
- Versuchsbeschreibung
- Pflanzennummer (zur eindeutigen Kennzeichnung jeder Pflanze)
- Datum der Messung

Je nach aktueller Versuchsanstellung ist es möglich, die Datenbank um zusätzliche Parameter zu erweitern.

Mit der zukünftigen Datenbank wird es möglich die Spektraldaten über eine größere Anzahl von Messungen hinweg auf Basis der Metadaten nach frei wählbaren Kriterien interaktiv zusammen zu stellen und auszuwerten. Beispielhaft sind hier die folgenden Abfragemöglichkeiten aufgeführt:

- Versuch → Pflanzenart → Pflanze
- Pflanzenart → Messregion → Wachstumsstadium
- Pflanzenart → Standortverhältnisse

Abbildung 8 zeigt die Verbindung der Datenbank zur umgebenden Infrastruktur.

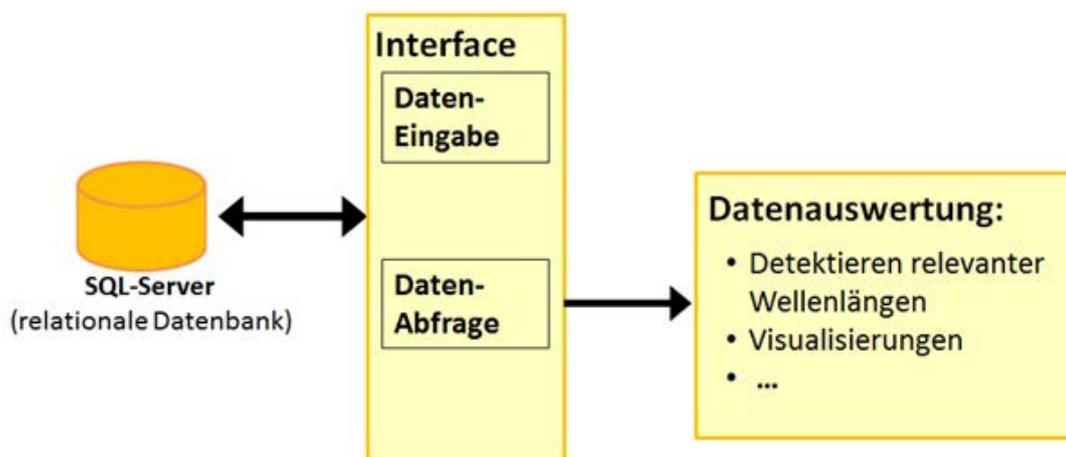


Abbildung 8: Anbindung der Datenbank an externe Software

Alle Daten können im ASCII-Format übergeben werden. Dies stellt sicher, dass die weitere Auswertung mit prinzipiell jedem Statistikprogramm erfolgen kann.

Die abgespeicherten Reflexionswerte der Gewebeklassen der Pflanzen werden vor der weiteren Auswertung normiert, so dass die Beleuchtungseinflüsse und andere Störparameter weitgehend minimiert werden. Die relativ kleinen Spektralprofilunterschiede zwischen den Klassen werden anhand von Scatterplots und 2D-Histogrammen quantifi-

ziert. Die 512 aufgezeichneten Wellenlängenbänder der Hyperspektralkamera ergeben 130816 Kombinationsmöglichkeiten für den paarweisen Vergleich zweier Wellenlängen. Da die auszuwertende Datenmenge relativ groß ist, bietet sich hier eine automatisierte Auswertung an, die im Folgenden beschrieben wird.

Zunächst werden die in der Datenbank abgespeicherten Spektralprofile anhand ihrer Metadaten gruppiert. Im hier dargestellten Beispiel wurden alle am 9.08.2012 gemessenen Ambrosia- und Beifußpflanzen, die an einem sonnigen Standort aufgezogen wurden und hiervon wiederum die Pflanzenstiele ausgewählt. Die so gefundenen Spektren wurden nach Ambrosia- und Beifußstielen gruppiert. Für jede dieser Gruppen wurden nun für alle 130816 möglichen Wellenlängenkombinationen die 2D-Histogramme gebildet und miteinander verglichen. Die Größe der Schnittmenge jeder Wellenlängenkombination ist hierbei ein Maß für die Klassifizierbarkeit beider Gruppen (siehe **Abbildung 7**).

In **Abbildung 9** sind beispielhaft die beiden 2D-Histogramme für die Wellenlängenkombination 560,5 und 640,6 nm dargestellt. Die Überschneidung der beiden Gruppen ist deutlich zu erkennen.

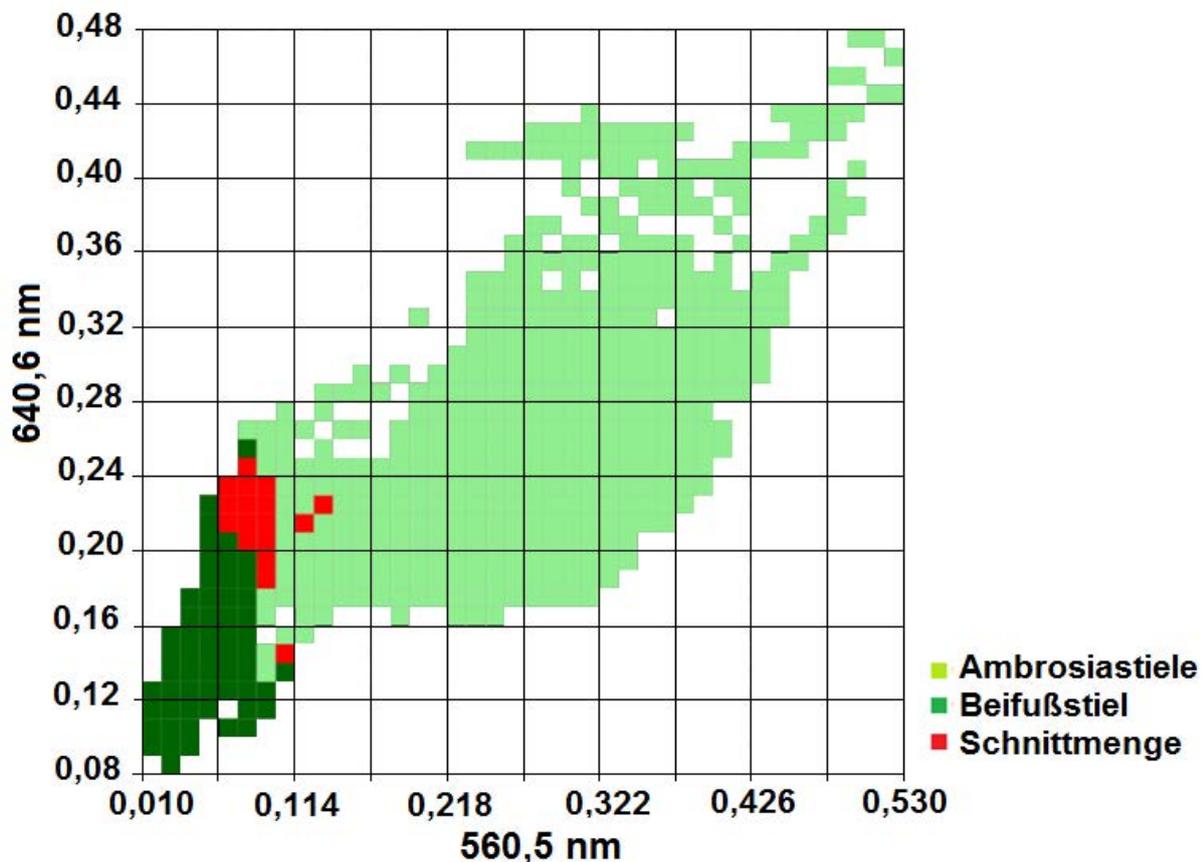


Abbildung 9: 2D-Histogramm der normierten Reflexion zweier Wellenlängen von Ambrosie- und Beifußstielen sowie der Schnittmenge beider Klassen

Die Größe der Schnittmenge wird für beide Klassen getrennt berechnet. Die prozentuale Größe ergibt sich aus dem Verhältnis der Pixelanzahl der Pixel die beiden Klassen zugeordnet werden können zur Pixelanzahl der gesamten Klasse. Für alle weiteren Berechnungen wird immer die größere Prozentzahl (der ungünstigere Wert) der beiden Schnittmengen zugrunde gelegt.

Je kleiner die Schnittmenge ist, umso besser lassen sich die Klassen anhand der jeweiligen Wellenlängenkombination unterscheiden.

Um einen schnellen Überblick über die Schnittmenge für alle möglichen Wellenlängenkombinationen zu erhalten, wird ein Intensitätsplot genutzt (siehe **Abbildung 10**). Die rot dargestellten Bereiche repräsentieren eine große Schnittmenge (schlechte Klassifizierung) die grünen eine kleine Schnittmenge (gute Klassifizierung).

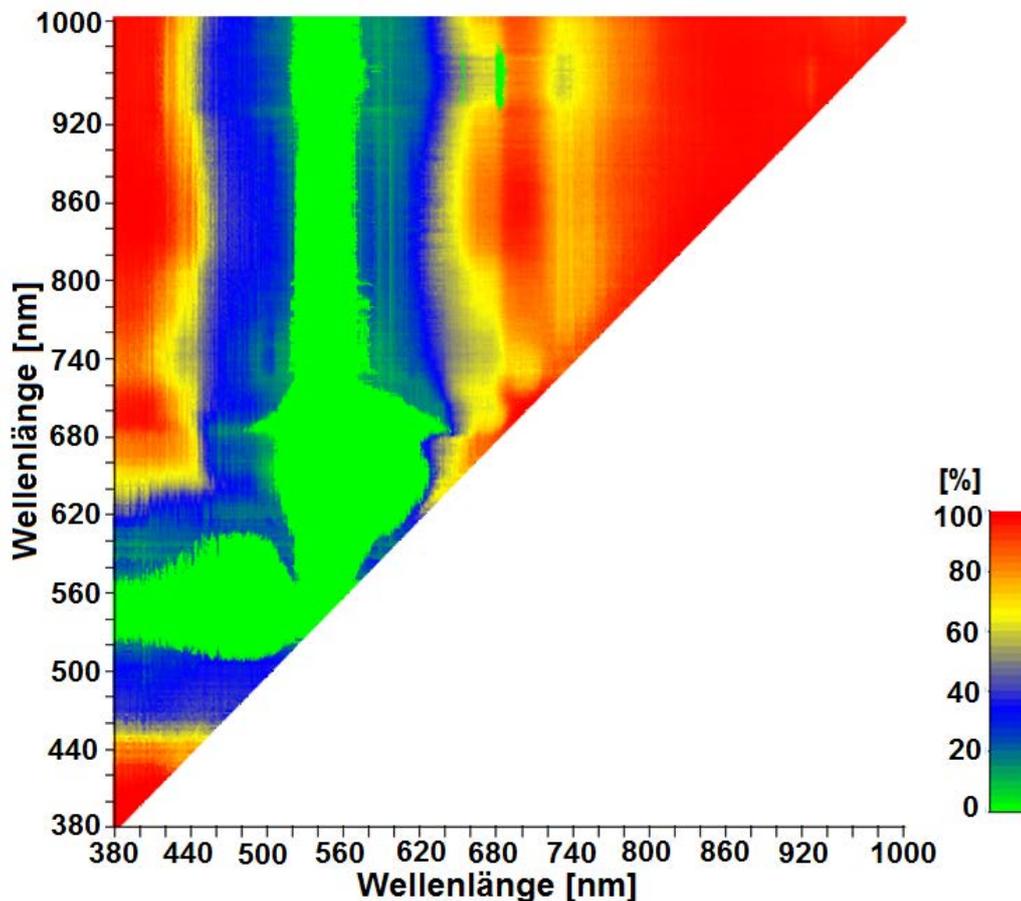


Abbildung 10: Schnittmengengröße in Abhängigkeit der Wellenlängenkombination

Mit der zukünftigen Datenbank soll eine Problemlösung für die Auswertung von Massendaten („Big Data“) von Hyperspektralbildern angeboten werden. Es ist möglich, einen ersten Überblick über die Unterscheidbarkeit von Pflanzenarten und Gewebeklassen auf Basis der Spektralprofile zu erhalten. Weiterhin werden Informationen über die Wellenlängen geliefert die zur Unterscheidung jeweils zweier Klassen herangezogen

werden können. Eine Reduzierung auf die zur Klassifizierung wichtigen Daten ist dadurch möglich.

Es ist zu erwarten, dass die Klassifizierbarkeit durch die Einbeziehung von morphologischen Merkmalen mit Hilfe der Computerbildanalyse weiter verbessert werden kann. Die Computerbildanalyse soll auch, unter Nutzung geeigneter Wellenlängen zur automatischen Auswahl der Regionen (ROI) herangezogen werden.

Literaturverzeichnis

- DAMMER K., INTREß J., USTYUZHANIN A. (2014):** Hyperspektrale Bildanalyse zur Unterscheidung von *Ambrosia artemisiifolia* und *Tagetes* ssp. In: Julius-Kühn-Archiv 445. (1868-9892), p. 131-138.
- DAMMER K., INTREß J., BEUCHE H., SELBECK J.; DWORAK V. (2013):** Discrimination of *Ambrosia artemisiifolia* L. and *Artemisia vulgaris* L. by hyperspectral image analysis during the growing season. *Weed Research*. 53 (2): 146-156 Online: <http://dx.doi.org/10.1111/wre.12006>
- KNIPLING E.B. (1970):** Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1, pp. 155-159. doi: 10.1016/S0034-4257(70)80021-9
- LICHTENTHALER H.K., GITELSON A., LANG M. (1996):** Non-Destructive Determination of Chlorophyll Content of Leaves of a Green and an Aurea Mutant of Tobacco by Reflectance Measurements. *J. Plant Physiol.* 148, pp. 483-493. doi: 10.1016/S0176-1617(96)80283-5

Vergleichende Ertragsvorhersage von Winterweizen- und Wintergerstensorten bei Trockenstress durch Messung der Bestandstemperatur

Comparative yield forecast of winter wheat and winter barley varieties under drought stress by canopy temperature measurement

Martin Kraft¹, Heiko Neeland¹, Angela Riedel²

¹ Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
Email: martin.kraft@ti.bund.de

² Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Geschäftsbereich Landwirtschaft, FB Pflanzenbau, Saatgut, SG Beregnung, Postfach 269, 30002 Hannover

Zusammenfassung: Internationale Veröffentlichungen deuten darauf hin, dass sich die Bestandstemperatur als ein Indikator für die Trockenempfindlichkeit und Ertragsstabilität unter Trockenstress in der züchterischen Selektion eignet.

Ziel dieser Untersuchung war die Ermittlung einer Korrelation zwischen der mittäglichen Bestandstemperatur und dem Ertrag von 8 Winterweizen bzw. 8 Wintergerstensorten in vierfacher Wiederholung auf einem sandigen Boden in Norddeutschland. Die erwartete negative Korrelation wurde mit Bestimmtheitsmaßen bis zu $r^2 = 0.42$ gefunden. Damit konnten die Unterschiede in der Bestandstemperatur die Ertragsunterschiede teilweise erklären.

Die Ergebnisse sind jedoch als Ausgangspunkt weiterer Untersuchungen zu sehen, um z.B. pflanzenbauliche, physiologische und phänologische Einflussfaktoren auf die Bestandstemperatur besser zu verstehen. Ein weiteres Ziel ist es herauszufinden, inwieweit Bestandstemperaturen eine Abschätzung des Trockenstresses auch bei ungünstigen Witterungseinflüssen wie Wind, Bewölkung und niedrigen Lufttemperaturen erlauben.

Deskriptoren: Trockenstress, Bestandstemperatur, Pflanzenzüchtung, Weizen, Gerste

Abstract: *International publications suggest the suitability of the crop canopy temperature as an indicator for drought stress sensitivity and yield stability under drought stress for the breeding selection.*

The aim of this investigation was to determine a correlation between midday canopy temperature and yield of 8 winter wheat resp. 8 winter barley varieties in four replications on a sandy soil in North Germany. The expected negative correlations were found with coeffi-

icients of determination up to $r^2 = 0.42$. That means that differences in canopy temperature were able to explain a certain part of differences in yield.

However, the results must be seen as a starting point for further investigations. Influencing factors of the crop temperature like cultivation practice and physiological and phenological crop state must be better understood. Further, it has to be determined how far the crop temperature allows crop drought stress assessment even under unfavourable weather conditions like wind, clouds and low temperatures.

Keywords: Drought stress, canopy temperature, plant breeding, wheat, barley

1 Einleitung

In der Züchtung von Kulturpflanzen spielt die Toleranz der Genotypen gegenüber Wassermangel weltweit eine gewichtige Rolle.

Der Vergleich verschiedener Genotypen auf ihre Ertragsstabilität unter Trockenstress erfolgt in erster Linie auf der Grundlage der Erntedaten im Anbauversuch. Aber auch bereits während des Wachstums können vergleichende Bewertungen der Genotypen erfolgen. Beispielsweise kann die stomatäre Leitfähigkeit der Blätter zerstörungsfrei mit einem Porometer gemessen werden. Unter Trockenstress ist die stomatäre Leitfähigkeit bei Genotypen mit hoher Trockentoleranz höher als bei trockenempfindlichen Genotypen (FISCHER *et al.* 1998, BEYEL 2003).

Die Messung der stomatären Leitfähigkeit mit einem Porometer ist ein sehr zeitaufwändiger Vorgang, wenn belastbare Werte gefordert werden. Zwischen der stomatären Leitfähigkeit und der Temperatur der Blätter und der Bestände besteht bei konstanten Umgebungsbedingungen ein enger Zusammenhang (BLONQUIST JR. *et al.* 2009). Ausreichend mit Wasser versorgte Winterweizenbestände weisen an sonnigen Sommertagen eine Evapotranspiration von mehr als 8 mm pro Tag auf. Die Verdunstung kühlt die Bestände so weit ab, dass die an der Oberfläche gemessene Bestandstemperatur trotz der intensiven Sonnenbestrahlung nahe der Umgebungstemperatur gehalten werden kann.

Bei unzureichendem Wasserangebot tritt jedoch eine Stresssituation ein, auf die die Pflanzen mit einer Reduzierung der Stomataweite reagieren, woraus eine verringerte Transpiration folgt. Damit reduziert sich die Verdunstungskühlung der Pflanzen, was zu einer höheren Bestandstemperatur führt. Verschiedene Genotypen unterscheiden sich unter Trockenstress teilweise deutlich in ihrer Bestandstemperatur – und auch im Ertrag.

Verschiedene internationale Autoren haben deshalb untersucht, ob sich auch die Bestandstemperatur als ein Maß für die züchterische Auswahl trockenoleranter Sorten eignet. In mehreren Trockenstressversuchen konnte eine Korrelation zwischen der Bestandstemperatur und dem Ertrag verschiedener Genotypen gezeigt werden: Solche Ergebnisse wurden beispielsweise für Winterweizen in Texas (BALOTA *et al.* 2007 und 2008), in Mexiko (SAINT PIERRE *et al.* 2010), in Israel (BLUM *et al.* 1989) und der Türkei (BAHAR *et al.*

2008), für Mais in Mexiko (ROMANO *et al.* 2011, ZIA *et al.* 2012) und für Reis in Brasilien (GUIMARÃES *et al.* 2010) berichtet.

Vergleichbare Untersuchungen unter norddeutschen Bedingungen sind nicht bekannt. Im Rahmen des von der EU und dem Land Niedersachsen geförderten Forschungsprojekts „AQUARIUS – dem Wasser kluge Wege ebnen“ bestand die Möglichkeit, in den Jahren 2011 und 2012 Beregnungsversuche auf der Versuchsstation der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Hamerstorf bei Uelzen zu begleiten. Der Standort besitzt einen wegen geringer Wasserspeicherkapazität schnell austrocknenden Boden (leicht schluffiger Sand). Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen Anbauversuch mit 8 Winterweizensorten im Jahr 2011 (KRAFT *et al.* 2013) und mit 8 Wintergerstesorten in 2012. In beiden Versuchen wurden zwei unterschiedliche Beregnungsstrategien mit einer unberegneten Variante verglichen. In dieser unberegneten Variante, die für alle 8 Sorten in 4 Wiederholungen angelegt war, fanden die hier berichteten Untersuchungen statt.

2 Versuchsanlage und Messungen

Für den Versuch wurden 8 am Markt verfügbare Winterweizen- bzw. Wintergerstesorten mit unterschiedlicher Ertragsleistung und Trockentoleranz ausgewählt. Die Aussaat erfolgte im Herbst 2010 bzw. 2011 in einer Versuchsanlage, die erlaubte, einen Teil der Parzellen mit einem Düsenwagen nach unterschiedlichen Beregnungsstrategien bei Bedarf mit Wasser zu versorgen. Ein Drittel der Parzellen wurde im ganzen Versuchszeitraum nicht beregnet. Jede Parzelle war ca. 12 m² (8,00 m x 1,50 m) groß. Der Boden war ein leicht schluffiger Sand. Düngung und Pflanzenschutz erfolgten standortbezogen optimal.

Die Temperaturmessungen im Winterweizen erfolgten an einem sonnigen Tag am 6. Juni 2011 in der Zeit von 10:45 Uhr bis 11:30 Uhr Ortszeit (Sonnenzeit). Die Lufttemperatur lag während der Messung zwischen 27,6°C und 29,4°C, die Globalstrahlung zwischen 820 W/m² und 1140 W/m² und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 39% und 45%. Die Windgeschwindigkeit wurde 2011 nicht gemessen.

Die Temperaturmessungen der Wintergerste erfolgten am 23. Mai 2012. Die gesamte Messung wurde an diesem Tag zweimal hintereinander durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Messwerte zu überprüfen. Während der ersten Messung von 11:00 Uhr bis 12:05 Uhr Ortszeit (Sonnenzeit) betrug die Lufttemperatur zwischen 25,4°C und 27,7°C, die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 46% und 60% und die Windgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,5 m/s und 3,7 m/s auf. Die Globalstrahlung konnte an dem Tag wegen eines technischen Problems nicht gemessen werden. Die zweite Messung schloss sich direkt an und dauerte von 12:10 Uhr bis 12:50 Uhr bei Lufttemperaturen zwischen 26,6°C und 29,7°C, einer Luftfeuchtigkeit zwischen 40% und 50% und Windgeschwindigkeiten zwischen 0,8 m/s und 3,8 m/s. Die zweite Messung erfolgte in entgegen gesetzter Laufrichtung zur ersten Messung, so dass die Parzellen in der zweiten Messung von den anderen drei Temperatursensoren gemessen wurden als in der ersten Messung.

Für die Temperaturmessungen wurde ein Messträger auf vier Fahrradrädern gebaut, welcher von zwei Personen über die Parzellen geschoben wurde. Auf dem Messträger waren je Parzelle drei Infrarot-Temperatursensoren der Serie Raytek MI3 angebracht. Ein Sensor (MI310 mit Vorsatzlinse) mit einem Öffnungswinkel von $19,6^\circ$ (zur Sensorachse) war in einer Höhe von 1,50 m über dem Boden angebracht und vertikal nach unten gerichtet. Um zu prüfen, ob ein schräger Blickwinkel für die Temperaturmessung besser geeignet ist, wurden zwei weitere Sensoren (MI302) mit einem Öffnungswinkel von $12,7^\circ$ in einer Höhe von 2,40 m über dem Boden um 30° gegen die Vertikale geneigt angebracht, so dass einer in Fahrtrichtung und der andere gegen die Fahrtrichtung ausgerichtet waren. Alle drei Sensoren waren auf dieselbe Stelle in Bodenhöhe gerichtet und konnten in Bodenhöhe eine Messfläche von $1,77 \text{ m}^2$ erfassen. Für die Auswertungen in diesem Bericht wurde die Bestandstemperatur bei jeder Messung als Durchschnitt der Messwerte aller 3 Sensoren berechnet. Die Sensoren waren auf einen Emissionsgrad von $\epsilon=1,0$ eingestellt. Der tatsächliche Emissionsgrad von Pflanzenbeständen lässt sich nicht exakt angeben, liegt aber etwas niedriger als 1,0. Die gemessenen Temperaturwerte waren deshalb geringfügig niedriger als die tatsächlichen.

Die Fahrt erfolgte in Längsrichtung der Parzellen (die Parzellen und die Pflanzenreihen lagen in Ost-/West-Richtung) und je Parzelle wurden ca. 2 bis 5 Messungen von nicht überlappenden Bereichen geschrieben, so dass je Parzelle eine Gesamtfläche von mindestens ca. $3,5 \text{ m}^2$ gemessen wurde. Es wurde der Durchschnitt der Messwerte aller drei Sensoren und jeder Parzelle berechnet. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden mit einer Feuchte- und Temperatursonde Rotronic HC2-S gemessen, die in einem aktiv belüfteten Strahlungsschutz in ca. 2,90 m Höhe über dem Boden auf dem Messträger eingebaut war. In gleicher Höhe war ein Pyranometer LI-COR LI-200 zur Messung der Globalstrahlung angebracht. Am Feldrand wurde die Windgeschwindigkeit mit einem stationären Ultraschallanemometer Gill WindSonic protokolliert.

Für den Winterweizen wurden die gemessenen Bestandstemperaturen im Hinblick auf die gleichzeitig gemessene Globalstrahlung korrigiert (PENNINGTON & HEATHERLY 1989). Die Korrektur fand getrennt für die Bestände unter Trockenstress und für die optimal wasserversorgten Bestände statt. In beiden Behandlungen wurde der Mittelwert ρ der gemessenen Globalstrahlungen ρ sowie die Steigung b einer linearen Regression zwischen der Bestandstemperatur T_{IR} und der Globalstrahlung ρ bestimmt. Daraus wurde die korrigierte Temperatur T_{Crop} wie folgt berechnet:

$$T_{Crop} = T_{IR} + b \cdot (\rho - \rho)$$

Aufgrund eines technischen Problems liegen für die Wintergerste keine Globalstrahlungswerte vor. Von den (geringen) Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur ging in beiden Versuchen kein statistisch nachweisbarer Einfluss auf die Messungen aus, so dass diese in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt wurden. Das gleiche galt für die 2012 zusätzlich gemessene Windgeschwindigkeit.

Zur Auswertung der gemessenen Bestandstemperatur wurde die Temperaturdifferenz

$$\Delta T_{CropAir} = T_{Crop} - T_{Air}$$

berechnet, also die Differenz zwischen der korrigierten Temperatur T_{Crop} des Bestands und der Temperatur T_{Air} der Umgebungsluft. Für die Trockenstressvariante wurde daneben die Temperaturdifferenz

$$\Delta T_{DryWet} = T_{Dry} - T_{Wet}$$

berechnet. Hier handelt es sich um die Differenz zwischen der korrigierten Bestandstemperatur T_{Dry} der unter Trockenstress stehenden Parzelle und der korrigierten Temperatur T_{Wet} der optimal berechneten Parzelle derselben Sorte in derselben Wiederholung.

Bei der Ernte wurde der Kornertrag jeder Parzelle bestimmt und auf einen Hektarertrag hochgerechnet. Zur vergleichenden Bewertung der Trockenstresstoleranz von Sorten wird häufig auch der Stresstoleranzindex STI (FERNANDEZ 1992) betrachtet:

$$STI_i = \frac{Y_{p_i}}{Y_p} \cdot \frac{Y_{s_i}}{Y_s} \cdot \frac{Y_s}{Y_p} = \frac{Y_{p_i} \cdot Y_{s_i}}{Y_p^2}, 1 < i < n$$

Er berechnet sich für jede Sorte i aus deren Ertrag Y_p unter optimal wasserversorgten Bedingungen (potenzieller Ertrag) und dem Ertrag Y_s unter Trockenstress. Dabei wird der spezifische Ertrag der Sorte auf den Durchschnittsertrag \bar{Y}_p und \bar{Y}_s aller n Sorten bezogen:

$$\bar{Y}_p = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_{p_i}$$

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_{s_i}$$

3 Ergebnisse und Diskussion

Der unberechnete Winterweizen (Versuchsjahr 2010/2011) unterlag sowohl am Termin der Bestandstemperaturmessung als auch im Laufe der ertragsrelevanten Wachstumszeiten einem deutlichen Trockenstress. Während die Sorten im Versuch bei optimaler Berechnung einen mittleren Ertrag von 8,1 t/ha erbrachten, lag der mittlere Ertrag in den unberechneten Varianten mit nur 3,5 t/ha um 56% niedriger. Auch in der Bestandstemperatur am 6. Juni war der Unterschied zwischen der berechneten Variante mit einem mittleren $\Delta T_{CropAir}$ von 1,0 K und der unberechneten Variante mit 11,4 K sehr ausgeprägt (**Abbildung 1**).

Bei der Wintergerste (Versuchsjahr 2011/2012) fiel der Minderertrag der unberechneten Variante nicht so stark aus wie beim Winterweizen in 2011. Die Gerste erbrachte im Versuch bei optimaler Berechnung einen mittleren Ertrag von 11,0 t/ha. Der mittlere Ertrag in der unberechneten Variante lag mit 7,6 t/ha um 30% niedriger. Die durchschnittliche Bestandstemperatur am 23. Mai lag in der berechneten Variante am Vormittag bei einem mittleren $\Delta T_{CropAir}$ von -0,1 K und in der zweiten Messfahrt bei +0,4 K, in der unberechneten Variante bei 4,4 K bzw. 4,5 K (**Abbildung 2**).

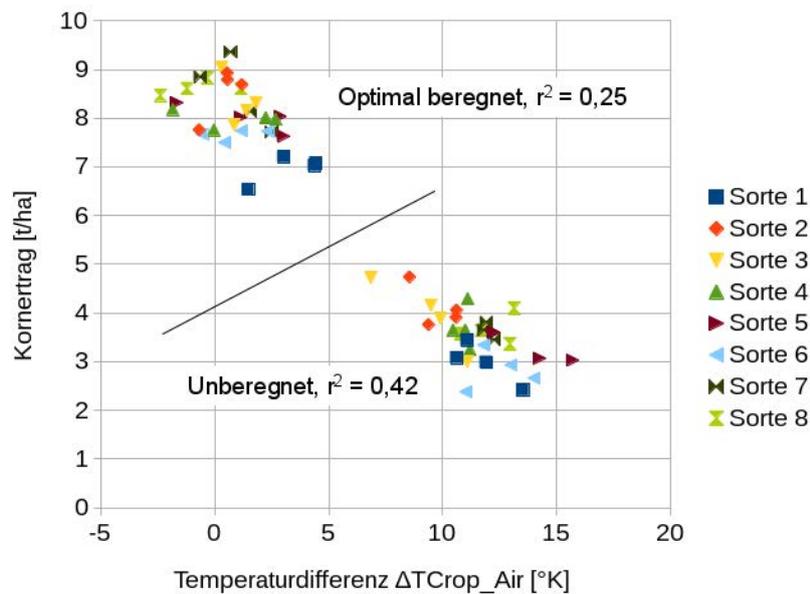


Abbildung 1: Der deutliche Trockenstress der unberechneten Weizenparzellen zeigt sich sowohl in einer Ertragsreduktion von 56% als auch in einer hohen Bestandstemperatur von $\Delta T_{\text{Crop_Air}} = 11,4$ K im Mittel.

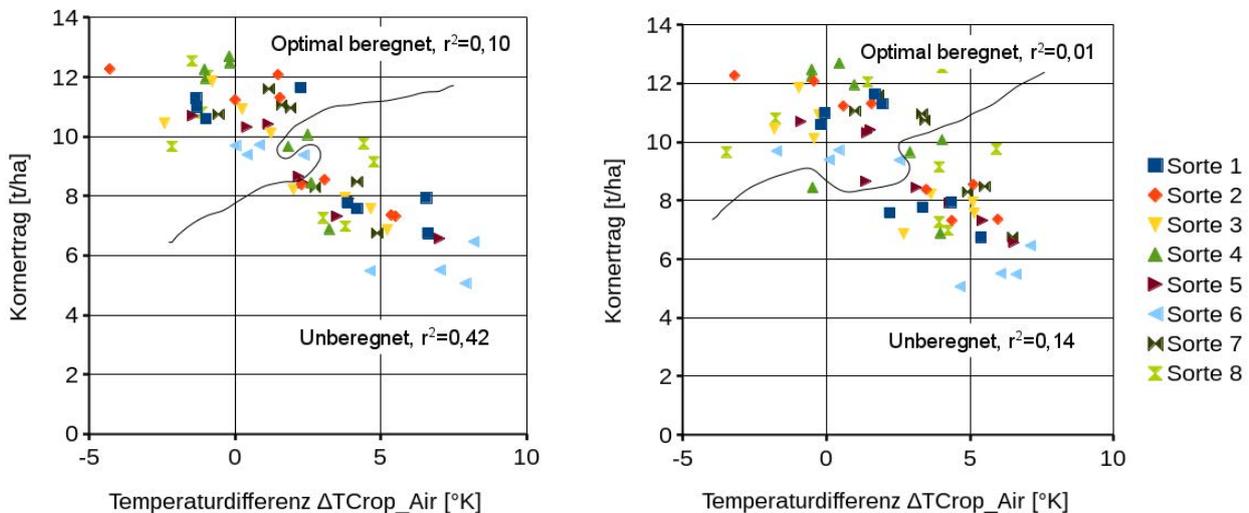


Abbildung 2: Im Wintergerstenversuch waren der Trockenstress und die Unterschiede zwischen der berechneten und der unberechneten Variante geringer ausgeprägt. Die trockenheitsbedingte Ertragsreduktion belief sich auf 30%; die Bestandstemperatur $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ lag in der unberechneten Variante am Messtag ca. 4,5 K höher als in der berechneten Variante. Links die Temperaturwerte der ersten Messung, rechts der zweiten Messung.

Sowohl der Korntrag der unberechneten Variante als auch der Stresstoleranzindex STI zeigten beim Weizen die erwartete negative Korrelation mit der gemessenen Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ (**Abbildung 3** oben). Die Bestimmtheitsmaße von $r^2=0,42$ bzw. $r^2=0,34$ ließen dabei erkennen, dass eine Vorhersage des Korntrags und des Stresstoleranzindex STI aus den Temperaturwerten nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich wäre.

Zwischen den Ertragswerten und der Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$ bestand kein nennenswerter statistischer Zusammenhang (**Abbildung 3** unten).

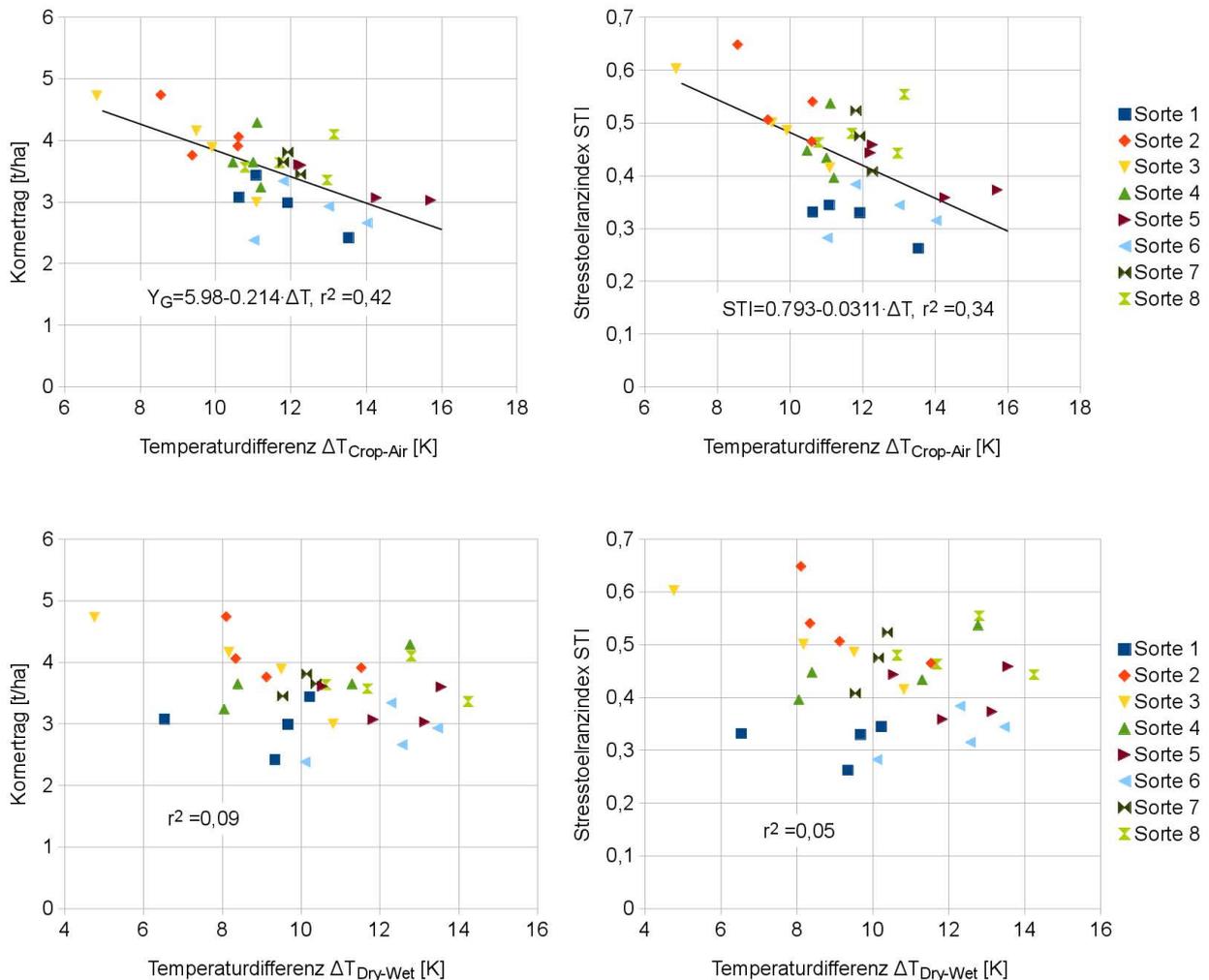


Abbildung 3: Unberechnete Variante des Winterweizens: Korntrag (links), Stresstoleranzindex STI (rechts) und Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ (oben) bzw. $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$ (unten) der 8 Winterweizensorten und 4 Wiederholungen unter Trockenstressbedingungen.

Auch bei der Gerste zeigten sowohl der Korntrag als auch der Stresstoleranzindex STI in der unberechneten Variante eine deutliche negative Korrelation mit der gemessenen Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ (**Abbildung 4**). Bei der ersten Messung lagen die Bestimmtheitsmaße beider Korrelationen bei $r^2=0,42$. Bei der zweiten Messung waren dagegen die Temperaturunterschiede zwischen den Sorten geringer und die Bestimmtheitsmaße gingen auf $r^2=0,14$ für den Korntrag bzw. $r^2=0,20$ für den STI zurück. Zwischen den Ertragswerten und der Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$ bestand ein schwacher statistischer Zusammenhang.

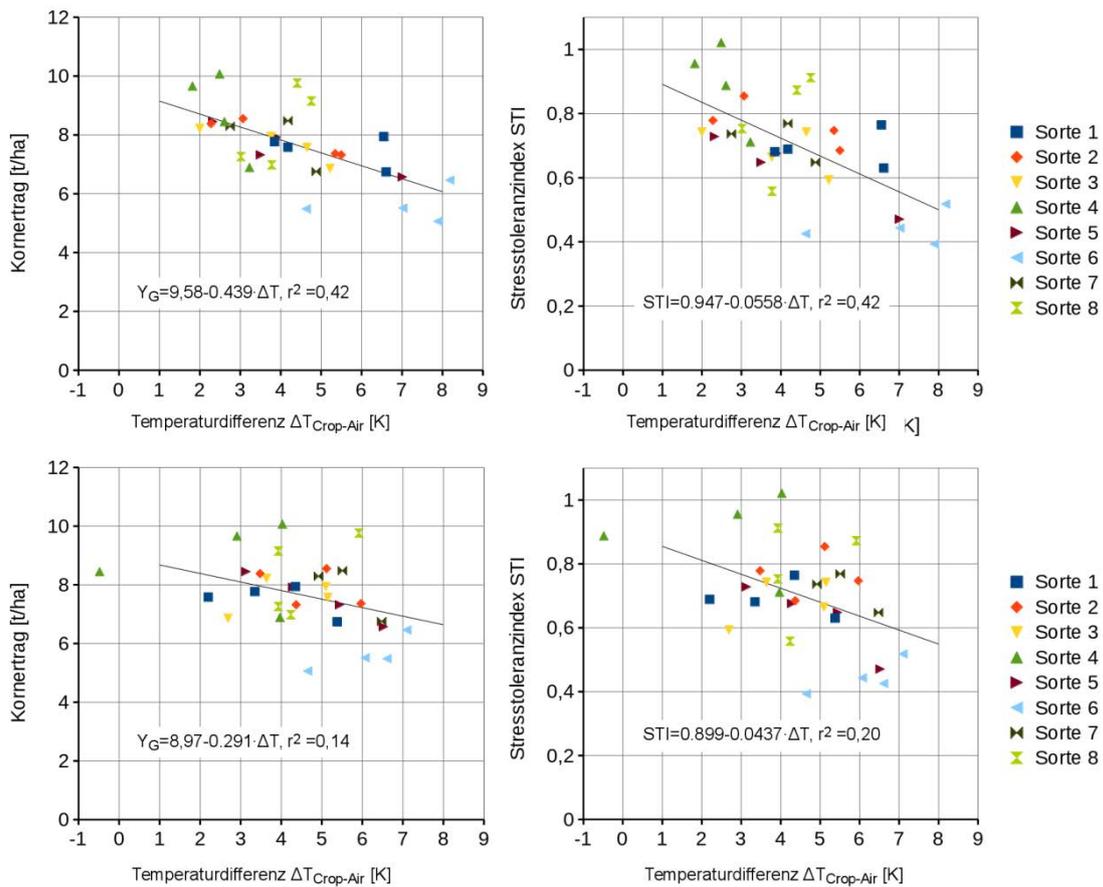


Abbildung 4: Unberechnete Variante der Wintergerste: Korrelation zwischen Korntrag (links), Stresstoleranzindex STI (rechts) und Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ der 8 Sorten und 4 Wiederholungen unter Trockenstressbedingungen. Oben: 1. Messung; unten: 2. Messung.

Tabelle 1: Statistische Prüfung durch einfaktorielle Varianzanalyse, ob sich die Ertrags- und Temperaturdaten der unberechneten Variante signifikant zwischen den Sorten unterscheiden. Bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit $< 5\%$ gilt es nach üblicher statistischer Praxis als abgesichert, dass der gemessene Parameter sortenabhängige Unterschiede aufweist. Bei der Wintergerste sind die Angaben getrennt für die erste und die zweite Messung ausgewiesen.

Parameter	Statistische Fehlerwahrscheinlichkeit	
	Weizen 2011	Gerste 2012
Korntrag	4,9%	1,3%
Stresstoleranzindex STI	0,3%	0
Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$	5,9%	2,4% / 15,7%
Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$	4,9%	9,8% / 23,0%

Mittels einfaktorieller Varianzanalyse konnte gezeigt werden, dass der Korntrag und der Stresstoleranzindex STI in beiden Versuchen signifikant von der Sorte abhing (**Tabelle 1**). Die Sortenabhängigkeit der Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$ und $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ konnte dage-

gen mit Fehlerwahrscheinlichkeiten teilweise oberhalb des üblichen Signifikanzkriteriums von 5% nicht in allen Fällen nachgewiesen werden.

Die sortenabhängigen Ertragsunterschiede bei Trockenstress und sortenbezogene Unterschiede im Stresstoleranzindex STI ließen sich zu einem gewissen Teil aus der Bestandstemperatur $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ der gestressten Bestände vorhersagen. Hierzu wurden für jede Sorte und Bewässerungsstufe die Mittelwerte der 4 Versuchswiederholungen herangezogen. Bei statistischer Betrachtung der Sortenmittelwerte ergaben sich höhere Bestimmtheitsmaße r^2 (**Tabelle 2**) als bei der statistischen Betrachtung aller Einzelparzellen (**Abbildungen 1 bis 4**).

Tabelle 2: Vorhersagbarkeit der sortenabhängigen Ertragsunterschiede bei Trockenstress und des sortenspezifischen Stresstoleranzindex STI aus der Bestandstemperatur $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ bei Berechnung aus den Sortenmittelwerten (Mittelwerte der 4 Versuchswiederholungen). Bei der Wintergerste sind die Angaben getrennt für die erste und die zweite Messung ausgewiesen.

Parameter	r^2	
	Weizen 2011	Gerste 2012
Kornertrag	0,52	0,88 / 0,53
Stresstoleranzindex STI	0,40	0,82 / 0,59

4 Zusammenfassung

In beiden Versuchen wurde mit je einem einzigen Termin für die Messung der Bestandstemperaturen die erwartete negative Korrelation zwischen Ertrag und der Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ unter Trockenstress mit einer gewissen statistischen Unsicherheit vorgefunden. Gleiches gilt für die Korrelation des Stresstoleranzindex STI mit der Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$. Dagegen wies die Temperaturdifferenz $\Delta T_{\text{Dry_Wet}}$ nur im Wintergerstenversuch (in der 1. Messung) einen signifikanten Bezug zum Kornertrag und zum STI auf.

Die Ergebnisse deuten auf eine Eignung der Bestandstemperatur für die Vorhersage von Ertragsunterschieden zwischen Sorten oder sortenspezifischen Unterschieden in der Stresstoleranz hin. Eine sichere Bewertung lässt sich aus diesen Ergebnissen jedoch noch nicht ableiten. Die Temperaturmessungen sollten zu mehreren Terminen erfolgen und davon der Mittelwert berechnet werden, woraus eine deutliche Verbesserung der Ertragsvorhersage zu erwarten ist (BALOTA *et al.* 2007).

Sowohl bei den Ertragsdaten als auch bei den Temperaturdifferenzen gab es deutliche Streuungen zwischen den Wiederholungen. Hier ist zu prüfen, welche weiteren Faktoren möglicherweise beeinflussend waren. Bodenunterschiede innerhalb der Versuchsfläche kommen ebenso in Betracht wie Pflanzenausfälle beispielsweise durch Tierfraß

In der 2. Messung der Wintergerste wichen die Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ überraschend stark von der ersten Messung am selben Tag ab. Ob die Uhrzeit oder die Rand-

bedingungen der ersten Messung besser geeignet waren als bei der zweiten Messung, konnte nicht geklärt werden. Die Standardabweichung der Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Crop_Air}}$ in den unberechneten Parzellen ging von 1,74 K in der ersten Messung auf 1,53 K in der zweiten Messung zurück. Die Korrelation der Temperaturdifferenzen aus der ersten und der zweiten Messung der unberechneten Variante betrug nur 0,55. Hierfür konnte keine überzeugende Erklärung gefunden werden. Die Randbedingungen beider Messungen waren sehr ähnlich. Die Fehlerquellen lagen also mit einiger Wahrscheinlichkeit in der verwendeten Messtechnik. Die Kalibrierung der (für dieses Projekt neu gekauften) Sensoren muss vor weiteren Messungen überprüft werden. Die Sensoren sollen für zukünftige Messungen mit einem einfachen Strahlungsschutz versehen werden. Im ungünstigsten Fall muss damit gerechnet werden, dass die Infrarot-Temperatursensoren selbst eine schlechtere Wiederholbarkeit besitzen, als es für diese Messungen erforderlich wäre.

Während die Temperaturmessungen in diesem Versuch mit einem von Hand geschobenen Messträger erfolgt sind, ist es grundsätzlich auch denkbar, diese mittels einer Thermografiekamera z.B. von einem unbemannten Luftfahrzeug für eine größere Zahl von Parzellen durchzuführen.

Danksagung:

Die Versuche erfolgten im Rahmen des Projekts „AQUARIUS – Dem Wasser kluge Wege ebnen“, das von der Europäischen Union und dem Land Niedersachsen gefördert wurde.

Literaturverzeichnis

- AQUARIUS (2012):** AQUARIUS – Dem Wasser kluge Wege ebnen! Projektbericht Langfassung. Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Hannover.
- BAHAR B., YILDIRIM M., BARUTCULAR C., GENÇ I. (2008):** Effect of Canopy Temperature Depression on Grain Yield and Yield Components in Bread and Durum Wheat. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 36: 34-37.
- BALOTA M., PAYNE W.A., EVETT S.R., LAZAR M.D. (2007):** Canopy Temperature Depression Sampling to Assess Grain Yield and Genotypic Differentiation in Winter Wheat. *Crop Science*. 47: 1518-1529.
- BALOTA M., PAYNE W.A., EVETT S.R., PETERS T.R. (2008):** Morphological and Physiological Traits Associated with Canopy Temperature Depression in Three Closely Related Wheat Lines. *Crop Science*. 48: 1897-1910.
- BEYEL V. (2003):** Wirkung von Trockenstreß auf unterschiedliche Kultivare von Sorghum bicolor. Diss. Universität Frankfurt.
- BLONQUIST J.M. JR., NORMAN J.M., BUGBEE B. (2009):** Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 1931-1945.
- BLUM A., SHIPILER L., FOLAN G., MAYER J. (1989):** Yield Stability and Canopy Temperature of Wheat Genotypes under Drought-Stress. *Crop Research*. 22: 289-296.

- FERNANDEZ G.C.J. (1992):** Effective Selection Criteria for Assessing Plant Stress Tolerance. Adaptations of Food Crops to Temperature and Water Stress. Proc. Int. Symp., Taipei, Taiwan, 13-18 Aug. 1992. Publ. no. 93-410: 257-270.
- FISCHER R.A., REES D., SYRE K.D., LU Z.M., CONDON A.G., LARQUE SAAVEDRA A. (1998):** Wheat Yield Progress Associated with Higher Stomatal Conductance and Photosynthetic Rate, and Cooler Canopies. *Crop Science*. 38: 1467-1475.
- KRAFT M., NEELAND H., RIEDEL A. (2013):** Vergleich der Bestandstemperatur und des Ertrags von acht Winterweizensorten unter Trockenstress: Ergebnisse eines Versuchsjahres. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 81, 287-294.
- GUIMARÃES C.M., STONE L.F., LORIEUX M., DE OLIVEIRA J.P., ALENCAR G.C.O., DIAS R.A.A. (2010):** Infrared thermometry for drought phenotyping of inter and intra specific upland rice lines. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 14: 148-154.
- ROMANO G., ZIA S., SPREER W., SANCHEZ C., CAIRNS J., ARAUS J.L., MÜLLER J. (2011):** Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*. 79: 67-74.
- PENNINGTON D.A., HEATHERLY L. (1989):** Effects of changing solar radiation on canopy-air temperatures of cotton and soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*. 46: 1-14.
- SAINT PIERRE C., CROSSA J., MANES Y., REYNOLDS M.P. (2010):** Gene action of canopy temperature in bread wheat under diverse environments. *Theor. Appl. Genet.* 120:1107-1117.
- ZIA S., ROMANO G., SPREER W., SANCHEZ C., CAIRNS J., ARAUS J.L., MÜLLER J. (2012):** Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-Stress Tolerant Maize Genotypes of Different. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 199: 75-84.

Smart-Kamera-basierte Online-Bildanalyse von Infrarot- und Stereobildern an Multikoptern

Smart Camera Based Online Analysis of Infrared and Stereo Images with Multicopters

Matthias Oelze, Falk Schmitsberger, Frieder Stolzenburg

Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik, Friedrichstraße 57-59,
D-38855 Wernigerode, Germany

Email: {moelze,fschmitsberger,fstolzenburg@hs-harz.de}

Zusammenfassung: Bei der Befliegung von Agrarflächen, Gebäuden und Windenergieanlagen durch Multikopter werden meist viele Bilder aufgenommen, die im Anschluss dann offline ausgewertet werden. Durch die Verwendung von Smart-Kameras kann ein Großteil der Bildauswertung schon online während des Fluges geschehen. Dadurch ergeben sich neue Anwendungsfelder, z.B. eine Online-Abstandsmessung zur Kollisionsvermeidung.

Deskriptoren: Smart-Kamera, Multikopter, Computer Vision, Nahinfrarot

Abstract: *During the aerial survey of agricultural crop land, buildings, and wind power plants by multicopters, often a lot of pictures are taken. Usually they are evaluated offline afterwards. By using smart cameras, much of the image analysis can already be done online during the flight. As a result, new applications arise, for example, online distance measurement for collision avoidance.*

Keywords: *smart camera, multicopters, computer vision, near-infrared*

1 Überblick

Im Labor Mobile Systeme an der Hochschule Harz werden in verschiedenen Projekten Multikopter eingesetzt. Ein Schwerpunkt liegt hier bei der Nutzung verschiedener Kamerasysteme. Neben der klassischen Digitalkamera und einer Wärmebildkamera kommt dabei eine sogenannte Smart-Kamera der Firma Vision Components (VISION COMPONENTS 2014) zum Einsatz (**Abbildung 1**). Diese Kamera ist mit einem Mikroprozessor bestückt, so dass die Bilder direkt in der Kamera verarbeitet und analysiert werden können. Für den Einsatz an einem Multikopter bedeutet dies, dass eine Online-Bildanalyse während des Fluges erfolgen kann.



Abbildung 1: Multikopter der Hochschule Harz mit montierter Smart-Kamera

Das Kameragehäuse wurde an der Hochschule Harz entwickelt und ermöglicht eine flexible Nutzung der Kamera. Durch die Benutzung verschiedener Filter können Bilder sowohl im sichtbaren als auch im Nahinfrarotbereich aufgenommen werden. **Abbildung 2** zeigt die Rückansicht des geöffneten Gehäuses. Unten befinden sich die Kameraköpfe mit einer Auflösung von jeweils 2048x1088 Pixeln, direkt darüber wird die Prozessorplatine der Smart-Kamera platziert. Außerdem wird ein Raspberry Pi (oben im Bild) zur Ansteuerung der Videofunkstrecke genutzt.

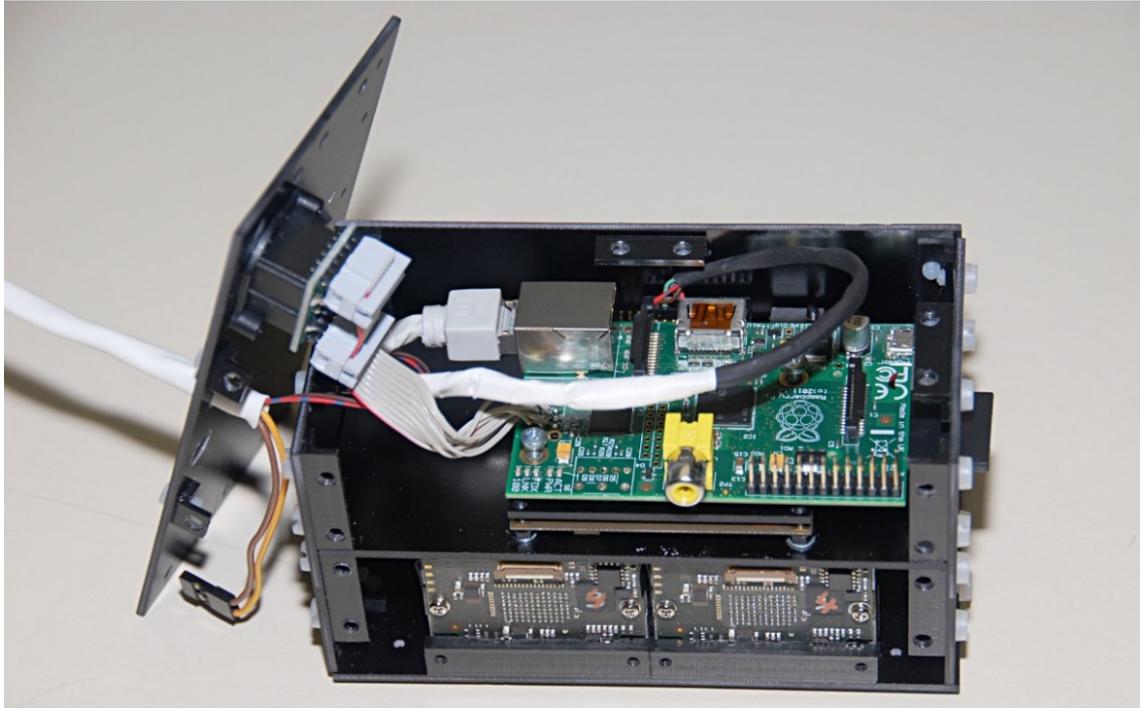


Abbildung 2: Smart-Kamera in selbst entwickeltem Gehäuse

Der Gehäuseaufbau erlaubt unterschiedliche Anordnungen der Kameraköpfe. Sie können entweder eng beieinander oder mit einem Abstand voneinander montiert werden. Die beiden verschiedenen Anordnungen der Kameraköpfe lassen sich in **Abbildung 3** erkennen. Links sind die Köpfe eng montiert (5 cm Abstand), rechts beträgt der Abstand 8,5 cm. Der Öffnungswinkel der verwendeten Objektive beträgt $57,32^\circ$ horizontal und $44,29^\circ$ vertikal.

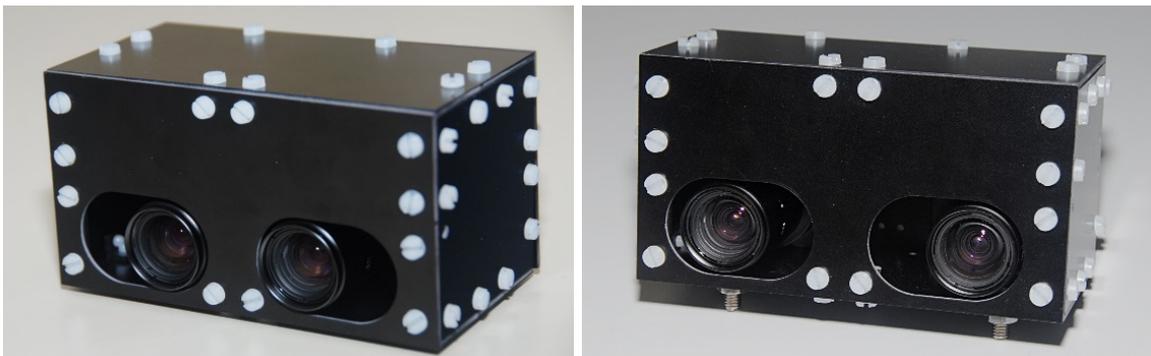


Abbildung 3: Smart-Kamera mit unterschiedlichen Basisbreiten

2 Nahinfrarotkamera

Werden die beiden Kameraköpfe der Smart-Kamera direkt nebeneinander montiert (**Abbildung 3** links), zeigen beide (bis auf einen kleinen Versatz) das gleiche Bild. Durch Verwendung eines Infrarot-Durchlassfilters in einem der beiden Köpfe lassen sich so zwei Bilder derselben Szene in verschiedenen Frequenzbereichen (Nahinfrarot und sichtbarer Bereich) erstellen. Auf Grundlage dieser Bilder lässt sich z.B. der „Nor-

malized Differenced Vegetation Index“ (NDVI) (WEIER & HERRING 2000) bestimmen. **Abbildung 4** zeigt eine Aufnahme des Campus in Wernigerode. Im NDVI-Bild lässt sich die Vegetation (hell) sehr gut erkennen.



Abbildung 4: Luftaufnahme im sichtbaren Bereich (links) und das NDVI-Bild (rechts)

3 Stereokamera

Durch die breitere Anordnung der beiden Kameraköpfe (**Abbildung 3** rechts) lässt sich die Smart-Kamera auch als Stereokamera zur Entfernungsmessung einsetzen (**Abbildung 5**). Die beiden Live-Bilder der Kameraköpfe werden (**Abbildung 5** oben) mit einem vorher berechneten Stereo-Kameramodell zueinander ausgerichtet (**Abbildung 5** links unten: rectified) und aus dem horizontalen Versatz der Bildinhalte wird deren jeweilige Entfernung zur Kamera berechnet (LAUTERBACH 2013). Im Beispiel (**Abbildung 5** rechts unten: disparity) wurde das Bild des linken Kamerakopfes mit den jeweils ermittelten Entfernungen eingefärbt. Die Auflösung der Bilder beträgt 640x360 Pixel und es werden im Messbereich von 1-10 m ein Fehler von unter 10% erreicht. Die Algorithmen wurden mit Hilfe der C++-Bibliothek OpenCV (BRADSKI & KAEHLER 2013) implementiert.

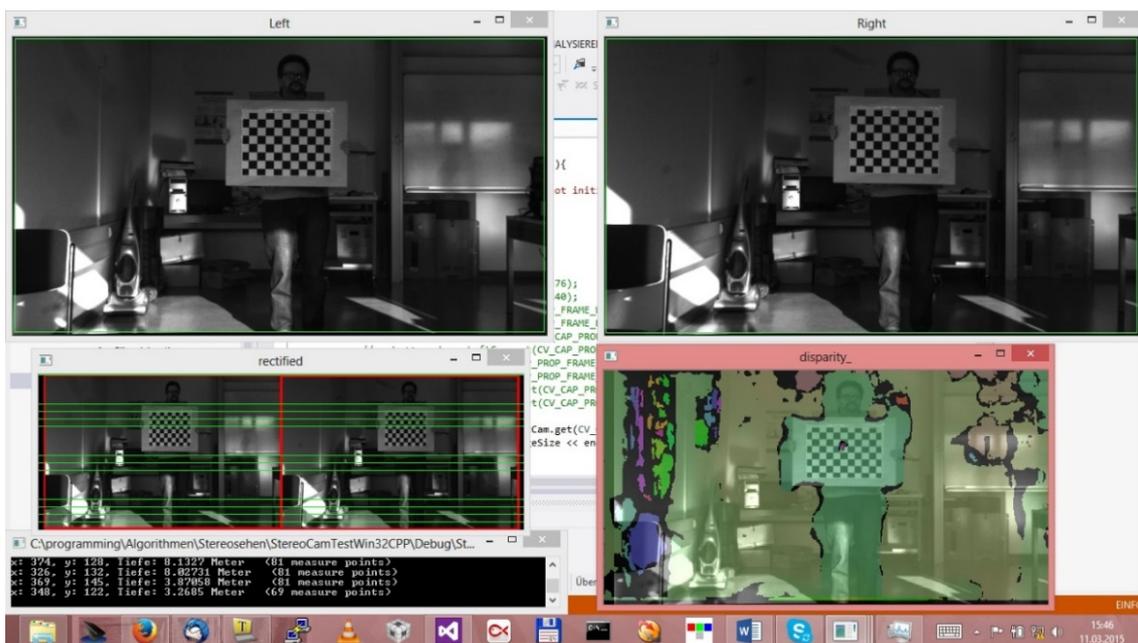


Abbildung 5: Entfernungsmessung mit Stereo-Kamera

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz einer Smart-Kamera an einem Multikopter ermöglicht interessante Anwendungen. Durch die Verarbeitung und Analyse der Bilder direkt in der Kamera können Prozesse wie Entfernungsmessung deutlich beschleunigt werden, da eine langsame und fehleranfällige Kommunikation zwischen Fluggerät und Bodenstation minimiert werden kann. Ein Ziel ist es, durch die weitere Verlagerung von Berechnungen in die Kamera diese Kommunikation weiter zu reduzieren.

Bei der Entfernungsmessung soll die Genauigkeit weiter verbessert und auf einen größeren Messbereich ausgedehnt werden. Durch die Live-Bild-Verarbeitung soll damit eine automatische Positionierung des Multikopters erreicht werden (Visual Docking). Außerdem ist eine Integration in das in der Entwicklung befindliche Flugassistenzsystem (MARKS *et al.* 2014) geplant.

Danksagung

Die laufenden Arbeiten werden teilweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) in den Projekten InfraKopter (Zusammenführung von mit Multikoptern aufgenommenen Infrarotaufnahmen) und InspektoKopter (Inspektion von Windenergieanlagen durch Multikopter) gefördert (Förderkennzeichen KF2488210LF2 bzw. 16KN021923). Wir danken auch unseren studentischen Kräften an der Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik, insbesondere Wolfgang Werner, Moritz Rabe und Matthias Körschens.

Literaturverzeichnis

BRADSKI G.R., KAEHLER A. (2013): Learning OpenCV – Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, O'Reilly, 2nd edition, Early Release Ebook

LAUTERBACH H.A. (2013): Stereo-Optische Abstandsmessung für einen autonomen Quadrocopter, Bachelorarbeit, Universität Würzburg

MARKS M., SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG, F. (2014): Optische Sensorik an Multikoptern. In *Proceedings 20. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft*, Seiten 1-8, Hochschule Osnabrück, 2014. Bornimer Agrartechnische Berichte.

VISION COMPONENTS (2014): VCSBC quadro Smart-Kamera,
URL: <http://www.vision-components.com/produkte/smart-kameras/vc-board-cam/>

WEIER J., HERRING D. (2000): Measuring Vegetation (NDVI & EVI),
URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

Bestimmung von Kulturpflanzeigenschaften mittels hyperspektraler Fernerkundung von einem Mikro-UAV

Detection of crop properties by means of hyperspectral remote sensing from a micro UAV

Dragos Constantin¹, Martin Rehak¹, Yosef Akhtman¹, Frank Liebisch²⁺

¹ *Institute of Environmental Engineering, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland*

² *Institute of Agricultural Sciences, Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Universitätsstrasse 2, 8092 Zürich Switzerland*
Email: frank.liebisch@usys.ethz.ch

+ *Presenter*

The presented poster is based partly on a talk given by Dragos Constantin at the 9th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy workshop in Luxembourg at the session for Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) based hyperspectral remote sensing of vegetation 16/Apr/2015.

Zusammenfassung: Luftgestützte Fernerkundungstechnologien stellen effektive Methoden zur Erforschung und Detektion von Pflanzeigenschaften dar. In dieser Studie wurde ein Hexakopter mit einer Miniatur-Hyperspektralbildkamera ausgestattet, welche 16 Kanäle im sichtbaren Bereich messen kann. Die einzelnen Hyperspektralbilder (HSI) wurden zu geo-rektifizierten und registriert Karten verrechnet, aus welchen die Daten zur Berechnung der spektralen Indices (SI) extrahiert wurden. Die SI's wurden mit Pflanzeigenschaften wie Blattstickstoffkonzentration (N_{conc}), Chlorophyll- (CHL_{tot}) und totalem Pigmentgehalt ($Pigm_{tot}$), Bedeckungsgrad (CC) und Blattflächenindex (LAI) korreliert. Die Beziehung von N_{conc} und CHL_{tot} wird im Detail unter Berücksichtigung von Messungsschwierigkeiten, wie der Wechselbeziehung zu LAI, und der Anwendung in Präzisionslandwirtschaft oder Pflanzenzüchtung diskutiert.

Deskriptoren: Hyperspektralkamera, unbemannte Luftfahrzeuge (UAV), Phänotypisierung, Präzisionslandwirtschaft,

Abstract: *Aerial hyperspectral remote sensing technologies provide effective methods for the exploration and study of plant and crop properties. In this study a custom made hexacopter was equipped with a small scale hyperspectral imaging (HSI) camera capable of measuring 16 bands in the visible range of the light. From single HSI images geo-rectified and registered maps were calculated and a selection of spectral indices (SI's) calculated from the provided data. The SI's were correlated to crop traits such as leaf nitrogen (N_{conc}), chlorophyll (CHL_{tot}) and total pigment concentration ($Pigm_{tot}$), canopy cover (CC) and leaf area index (LAI), measured in the field. The relationships to N_{conc}*

and CHL_{tot} are discussed in detail with respect to measurement constraints, such as the interrelationships to LAI and application for precision farming or breeding experiments.

Keywords: hyperspectral camera, unmanned aerial vehicles (UAV), phenotyping, precision agriculture

1 Introduction

Aerial hyperspectral remote sensing technologies provide effective methods for the exploration and study of plant and crop traits. The recent progress in miniaturization of imaging and processing modules enables the use of low-cost unmanned aerial vehicles (UAV) as sensor carriers (COLOMINA & MOLINA 2014). They offer a great potential for local area remote sensing applications, such as for agriculture, forestry, mining industry and hydrological applications. For agriculture in particular they will allow non-destructive detection of plant biophysical and chemical properties (MULLA 2013, LIEBISCH *et al.* 2014, LIEBISCH *et al.* 2015) with a high spatial and temporal resolution relevant for precision farming and for agricultural research and phenotyping in particular (WALTER *et al.* 2015).

We present a case study conducted over the Field Phenotyping Platform (FIP) (presented by KIRCHGESSNER *et al.*, at this workshop) at the ETH Zürich research station for plant sciences in Eschikon, Lindau (KIRCHGESSNER *et al.* 2015), as collaboration between EPFL TOPO laboratory, Gamaya Company and the ETHZ Crop Science Laboratory. The aim of this case study was to test the determination of crop properties and phenotypes as related to spectral characteristics by using a novel hyperspectral imaging (HSI) snapshot camera with 16 bands in the visible range developed by Gamaya, Lausanne, Switzerland (2014).

2 Method

2.1 The sensor carrier

The UAV deployed during this study was a custom made hexa-copter with Pixhawk autopilot (PIXHAWK 2014) portrayed (**Figure 1**). The unit allows for execution of manual and automatic flights as well as a tight integration with the imaging system. The cameras were integrated together with an embedded computer assuring a proper triggering and synchronization of all the components. Moreover, the camera sensor head was accompanied by global navigation satellite system and inertial navigation system (GNSS/INS) constituting a compact all-in-one remote sensing system. The navigation and imaging systems were synchronized to provide precise position and orientation information for each acquired image that in turn speeds up the processing. In addition, the precise knowledge of exterior orientation parameters allows creating seamless orthomosaic-images and multispectral maps (**Figure 2**) without the need of establishing

ground control points which significantly reduces the time and resources needed for application in the field.

3 The sensor and spectral data analysis

Gamaya provides turnkey UAV-optimised hyperspectral imaging solutions for industrial applications and develops applications for precision agriculture and other purposes. In this study a model with 2MP sensor (2048 x 1088 px) spatial resolution and 16 bands in the visible range (450-650 nm) and a monochrome model with the same resolution were used. Each camera has a size of 4x4x6 cm and a weight of 100-120 g depending on mounted optic. In particular, the snapshot imaging model allows for the use of modern image processing based techniques for the geometric registration of HSI data. The hyperspectral data cubes were evaluated and plot data corresponding to the ground sampling points extracted with ENVI 5.1 (Exelis, Inc, US). Subsequently, spectral data from a set of 34 plots (4 m²) including a range of different crops (soybean, sunflower, maize and buckwheat) were plant properties were determined. We calculated eight spectral indices (SI) reported for visible range (**Table 1**).

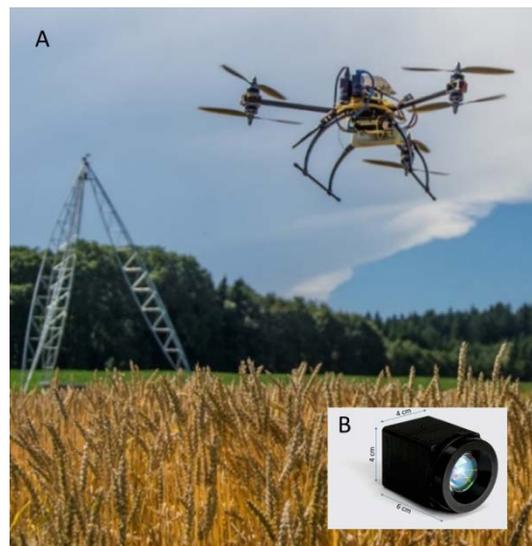


Figure 1: UAV Hexacopter mounted with two Gamaya cameras in the FIP field (A) and the camera in detail (B)

Table 1: A Selection of spectral indices in the visible range of the spectrum and related references.

Name	Abbreviation	Equation	References
Green leaf index	GLI	$(2 \times R_g - R_r - R_b) / (2 \times R_g + R_r + R_b)$	HUNT <i>et al.</i> (2011) [#]
Summed green reflectance	SGR	$\sum R_{500-599}$	(PU 2011)
Vegetation index green	Vlgreen	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	THENKABAIL <i>et al.</i> (2012)
Carotenoid reflectance index 550	CRI1	$(1/R_{510}) - (1/R_{550})$	GITELSON <i>et al.</i> (2002)
Photochemical reflectance index	PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	GAMON <i>et al.</i> (1992)
Red-green ratio	RGR	R_r / R_g	SIMS & GAMON (2002) [#]
Plant pigment ratio	PPR	$(R_{550} - R_{450}) / (R_{550} + R_{450})$	WANG <i>et al.</i> (2004)
Triangular greenness index	TGI	$-0.5[(W_{670} - W_{480})(R_{670} - R_{550}) - (W_{670} - W_{550})(R_{670} - R_{480})]$	HUNT <i>et al.</i> (2011)

R = reflectance, subscript numbers represent wavelength, b = blue (450-520 nm), g = green (520-600 nm), r = Red (630-690 nm), W = wavelength

[#] calculated as narrow band here using the narrow bands closest to the band centre of the camera bands given above.

4 Field experiment

For the 34 plots (4 m²) shown in **figure 2** including a range of different crops (soybean, sunflower, maize and buckwheat) a set of seven plant traits were determined. The investigated traits were leaf nitrogen, chlorophyll and total pigment concentration (in mg g⁻¹), canopy cover (fraction of plant per area of soil %), leaf area index (m² m⁻²), SPAD (leaf greenness) and canopy height (cm). Further methodological details can be found in LIEBISCH *et al.* (2014 and 2015).

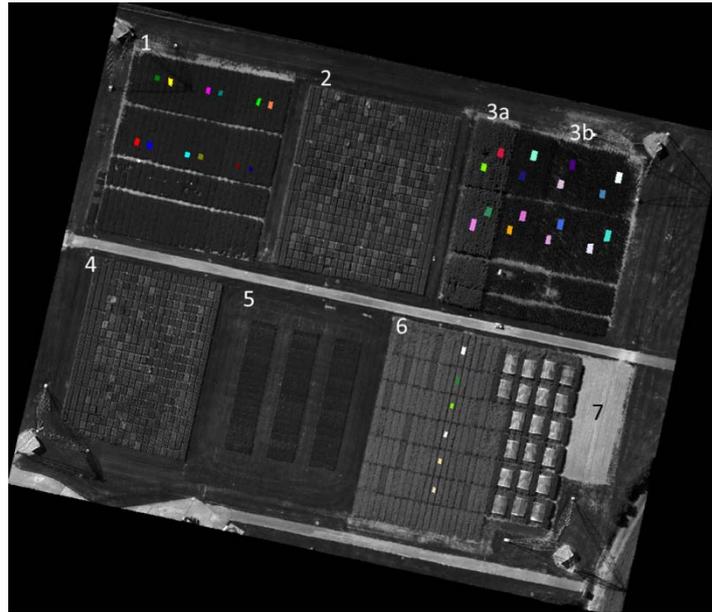


Figure 2: Test location at the FIP site at the ETH Zürich research station in Eschikon, Lindau. A total of 7 crop species was cultivated with a varying extend of genotypes, respectively: 1 soy bean, 2 +4 winter wheat, 3a sun flower, 3b maize, 5 red clover and 6 buckwheat. The location of the 34 sampling plots is indicated by small squares (ROIs) in the image. The intermediate soil cover is a mulch meadow and an open soil area was integrated (7).

5 Results and Discussion

The presented results reflect measurements at a single measurement date with recommended nutrient input during growth, assuming no restrictions in nutrient availability. Therefore, the observed variances within a given crop species were rather small and represent mostly genotype differences. The variability found between the investigated crop species were useful to deduce general relationships between plant traits and remote detected spectral indices and their application in agricultural settings. For the use as decision support crop specific relationships need to be established considering controlled input experiments.

Integrating several crops for each of the eight plant traits good to very good (marked by ***) relationships to the remote detected SIs (**Table 1**) were identified and are reported as coefficients of correlation in **table 2**. Three examples for a linear relationship between remote detected SI and ground observed plant traits are plotted in detail in **figure 3**. Interestingly, for the three strongly interlinked plant traits leaf nitrogen concentration (N_{conc}), leaf total chlorophyll concentration (CHL_{tot}) and leaf SPAD value (SPAD) different SIs were found to be superior for detection. PRI was found to be the best indicator for N_{conc} , while it was not related to CHL_{tot} and SPAD values. A map of the observed PRI and the respective N concentration is shown in Figure 5A and B. SGR was the best indicator for CHL_{tot} and Pigm_{tot} , whereas it was well correlated to SPAD too, but only weakly related to leaf N_{conc} . The best remote SI for SPAD was the TGI, which was well correlated to CHL_{tot} and Pigm_{tot} , but not to N_{conc} .

Canopy cover and LAI, two traits reflecting canopy architecture were best represented by PRI and TGI reflecting a well-known trade off compromising the leaf biochemical information included in the signal. However, the SGR was not correlated to CC and LAI and thus could potentially be used as independent indicator for CHL_{tot} . For N_{conc} detection a correction for the present CC or LAI by means of the independent TGI could improve reliability of remote detection of N_{conc} , irrespective of the present crop ($r^2 = 0.54^{***}$, data not shown). The best use of HSI data for precision farming such as detection of trait variation in the field or trait detection for breeding should be subject of further studies.

Table 2: Correlation coefficients of spectral indices and plant traits measured in the field (Ground truth).

Spectral index	Ground truth data							
	trait	N_{conc}	CHL_{tot}	$Pigm_{tot}$	CC	LAI	SPAD	Height
	unit	$mg\ g^{-1}$	$mg\ g^{-1}$	$mg\ g^{-1}$	%	$m^2\ m^{-2}$		cm
	n	34	33	33	34	34	34	34
GLI		0.56 ***	0.59 ***	0.58 ***	0.43 *	0.35 *	0.17 ns	-0.15 ns
SGR		-0.34 *	-0.95 ***	-0.94 ***	0.13 ns	0.2 ns	-0.68 ***	-0.33 ns
Vlgreen		0.64 ***	0.46 **	0.45 **	0.58 ***	0.51 **	-0.01 ns	-0.3 ns
CRI1		0.04 ns	0.78 ***	0.79 ***	-0.3 ns	-0.36 *	0.74 ***	0.39 *
PRI		0.71 ***	0.23 ns	0.21 ns	0.78 ***	0.71 ***	-0.3 ns	-0.5 **
RGR		-0.64 ***	-0.47 **	-0.46 **	-0.58 ***	-0.51 **	0 ns	0.28 ns
PPR		0.54 ***	0.61 ***	0.6 ***	0.4 *	0.31 ns	0.2 ns	-0.12 ns
TGI		0.07 ns	-0.83 ***	-0.83 ***	0.58 ***	0.62 ***	-0.89 ***	-0.58 ***

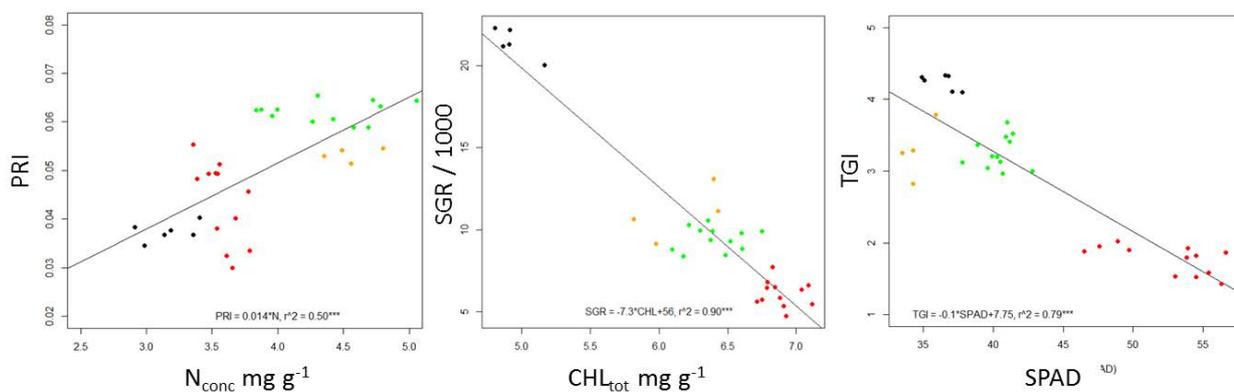


Figure 3: Linear relationship between the three SI's PRI, SGR and TGI to N_{conc} , CHL_{tot} and SPAD, respectively. The colored circles represent maize (red), sun flower (orange), soy bean (green) and buckwheat (black).

The spatial resolution obtained with the investigated sensor at 30 m altitude seems to be sufficient to detect small plot experiments and to some extent single plants and thus is applicable for phenotyping experiments for plant breeding (**Figure 4**). At this scale of resolution it may partially be possible to disentangle soil and plant signals by means of segmentation as shown in Figure 4B (black = non plant pixels). However, the ground pixel size of 5-7 cm as observed in this study still results in mixed pixels, which may compromise the accuracy and precision of the remote indicators derived from the HSI data. Similar effects were discussed by LIEBISCH *et al.* (2015) for NIR, RGB and thermal imaging. Flying at lower altitudes may improve the spatial resolution if needed.

Although only in the visible range the spectral resolution of the investigated sensor was sufficient to calculate several narrow band SI's found to reliably detect plant traits. The very high correlation to SPAD and CHL_{tot} indicates its superiority in contrast to broad band or consumer grade cameras (LIEBISCH *et al.* 2015, HUNT *et al.* 2011). Additionally, the availability of the 16 spectral bands allowed calculating at least partially independent SI's which might enable a better remote field diagnosis in the future by using different trait indicators in combination (LIEBISCH *et al.* 2014). An even higher spectral range, particularly including the near infrared range is desirable as it will allow using a wider selection of SI's. This will offer detection of other traits, such as water or phenol contents of plants or may eventually be superior for plant trait detection.

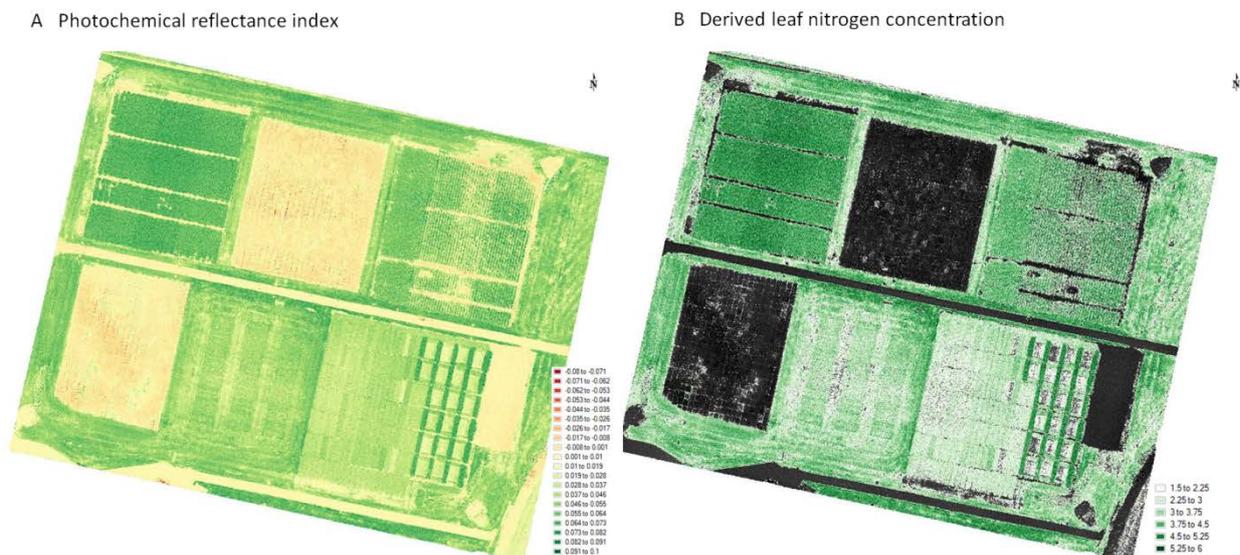


Figure 4: PRI map calculated from the HSI cube (left) and leaf nitrogen concentration (mg g^{-1}) map (right) as derived from its relationship to PRI ($N_{\text{conc}} = \text{PRI}/0.014$). Black pixels ($N_{\text{conc}} < 1.5 \text{ mg g}^{-1}$ corresponding to $\text{PRI} < 0.021$) represent non plant pixels.

6 Conclusion and outlook

The 16 band visible range camera was successfully tested in an agricultural setting. From the investigated spectral indices reliable indicators for all tested plant traits were identified. Particularly, the detection of leaf nitrogen and total chlorophyll concentration

was realized by means of the photochemical reflectance index and the sum of green reflectance respectively. However, for application in precision farming a species specific testing with variable nitrogen inputs would be important. A higher spectral range and advanced post processing are likely to improve the applicability of HSI in agriculture.

Acknowledgment

We thank A. Rieder and J. Heyer for the ground truth measurements and lab analyses during the measurement campaign in July 2014 supported by a grant of the Swiss University Conference and the ETH - Board in the frame of the Swiss Earth Observatory Network (SEON). We also thank H. Zellweger and N. Kirchgessner for their precious help for this project.

References

- COLOMINA I., MOLINA P. (2014):** Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92, 79-97.
- GAMAYA (2014):** Accessed 12.12.2014, <http://www.gamaya.com>.
- GAMON J.A., PEÑUELAS J., FIELD C.B. (1992):** A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41, 35-44.
- GITELSON A.A., ZUR Y., CHIVKUNOVA O.B., MERZLYAK M.N. (2002):** Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology* 75, 272-281.
- HUNT E.R., DAUGHTRY C.S.T., EITEL J.U.H., LONG D.S. (2011):** Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal* 103, 1090-1099.
- KIRCHGESSNER N., LIEBISCH F., HUND A., WALTER A. (2015):** Field imaging platform (FIP) – an automated system for plant phenotyping in the field. 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft am 7. Mai 2015 Braunschweig.
- LIEBISCH F., KIRCHGESSNER N., SCHNEIDER D., WALTER A., HUND A. (2015):** Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. *Plant Methods* 11, 9.
- LIEBISCH F., KÜNG G., DAMM A., WALTER A. (2014):** Characterization of crop vitality and resource use efficiency by means of combining imaging spectroscopy based plant traits. Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing. IEEE International, 24-27 June, Lausanne, Switzerland.
- MULLA D.J. (2013):** Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* 114, 358-371.
- PIXHAWK (2014):** Accessed 12.12.2014, <https://pixhawk.ethz.ch/>.
- PU R. (2011):** Detecting and mapping invasive species by using hyperspectral data. In: Thenkabail, P.S. (Ed.), *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. CRC Press, Boca Raton.
- SIMS D., GAMON J. (2002):** Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens Environ.* 81, 337 - 354.

- THENKABAIL P.S., LYON J.G., HUETE A. (2012):** Hyperspectral remote sensing of vegetation. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca raton.
- WALTER A., LIEBISCH F., HUND A. (2015):** Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. *Plant Methods* 11, 14.
- WANG Z.J., WANG J.H., LIU L.Y., HUANG W.J., ZHAO C.J., WANG C.Z. (2004):** Prediction of grain protein content in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using plant pigment ratio (PPR). *Field Crops Research* 90, 311-321.

Computer-controlled automatic image acquisition and processing of fine roots with an minirhizotron system

Computergesteuerte automatische Bilderfassung und Verarbeitung von Feinwurzeln mit einem Minirhizotronsysteem

Maik Veste¹, Gerhard Kast², Hans-Peter Schäfer³, Rüdiger Harms⁴

¹ CEBra - Centrum für Energietechnologie Brandenburg e.V., Friedlieb-Runge-Strasse 3, 03046 Cottbus

Email: maik.veste@me.com

² UP Umweltanalytische Produkte GmbH, Taubenstrasse 4, 03046 Cottbus

³ Schäfer GmbH - Industrielle Meß- und Videotechnik, Trautenstrasse 6, 38118 Braunschweig

⁴ PhysComp, Sperlingsgasse 17A, 38126 Braunschweig

Zusammenfassung: Ein vollautomatisches Minirhizotronsysteem wurde in den vergangenen Jahren entwickelt und erfolgreich getestet. Das System basiert auf einer Fingerkamera und erlaubt ein vollautomatisches Erfassen von Wurzeln bis zu einer Bodentiefe von 160 cm.

Deskriptoren: Automatisches Minirhizotronsysteem, Wurzelsysteem, Fingerkamera

Abstract: A fully automatic minirhizotron system was developed in the recent years and successfully tested. The minirhizotron system is based on a finger cam (Sony) and allows a fully automatic detection of roots until a soil depth of 160 cm.

Keywords: automated minirhizotron system, root system, finger camera

1 Introduction

The root systems of plants play an important part in the carbon allocation and for the uptake of nutrients and water. However, research on plant root systems under field conditions is difficult, because the soil limits the direct observation. Soil and ingrowth cores give only estimates of standing root biomass and relative growth and they are destructive. On the other hand, the minirhizotron method permit the measurement of fine root production, mortality and turn-over (MAJDI *et al.* 2005, VESTE 2012). Absolute values of fine root production and mortality can be estimated by combining data from minirhizotrons and soil cores. Seasonal changes in the root dynamic can be related directly to above ground production. Minirhizotrons can provide qualitative information on root color, branching and the development of mycorrhiza. The minirhizotron technique can be used to monitor the same root(s) over selected time intervals, which

can vary from days to years. In the last two decades different techniques were developed for the in-situ root observations: (i) video technique (FERGUSON & SMUCKER 1989, AMATO *et al.* 2012), (ii) endoscopes (VESTE 2012) and (iii) scanner-systems (DANNOURA *et al.* 2008). We developed a fully automatic minirhizotron system (**Figure 1**, VESTE *et al.* 2013) to optimize the workflow and to improved the accuracy of the inventory of the root systems.



Figure 1: Computer-controlled automatic minirhizotron system.

2 Automatic minirhizotron system

The minirhizotron system is based on a finger cam (Sony) and allows a fully automatic scan of roots in the soil. For the root recording a color and a monochrome camera with a diameter of 28 mm were developed. The cameras use a PAL signal, which is converted directly by a USB-video converter into a digital image (JPEG). In order to minimize the reflections in the glass tubes indirect illumination of LED are used. The light is located in the lower part of the camera. Computer-controlled step motors allows x-/y-positioning of the camera along the glass tube with a high and reliable accuracy. For the positioning of the camera three different operational mode are available:

manual movement in the tube;

computer-controlled positioning of the camera at elected coordinates (depth, angle);

fully automatic scan of the entire tube in freely definable depth ranges.

The recorded picture is stored on the hard discs in JPEG format as individual image and assembled to one large image of the entire tube. Examples of root captures from the black and white camera and of the color camera are shown in **Figure 2**.

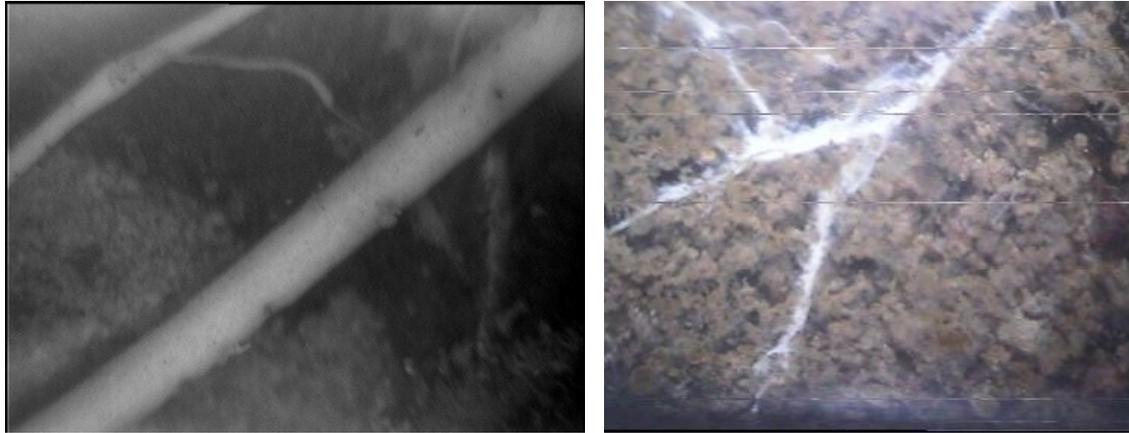


Figure 2: (A) Root image of the black and white camera and (B) of the color camera.

The special software *ROOTS* optimized the image quality, reduce noises and enhance the contrast of the image (HARMS *et al.* 2014) for further root detection and analysis with the open-source software RootFly. The future development of the minirhizotrons needs an improved system of image analysis to optimize the data analysis. The high number of root data requires an automatic detection of the roots in the image, but such a system is still under development (ERZ *et al.* 2005, VESTE 2010).

Acknowledgements

The system was developed by funding provided by Ministerium für Wirtschaft und Europaangelegenheiten, Brandenburg, Germany.

References

- AMATO M., LUPO F., BITTELA G., BOCHICCHIO R., ABEL AZIZ M, CELANO G. (2012): A high quality low-costs digital microscope minirhizotron system. *Computers and Electronics in Agriculture* 80: 50-53.
- DANNOURA M., KOMINAMI Y., OGUMA H., KANAZAWA Y. (2008): The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root* 2: 14-18.
- ERZ G., VESTE M., ANLAUF H., BRECKLE S.-W., POSCH S. (2005): A region and contour based technique for automatic detection of roots of tomatoes in minirhizotron images. *Applied Botany and Food Quality* 79: 83-88.
- FERGUSON J.C., SMUCKER A.J.M. (1989): Modifications of the minirhizotron video camera system for measuring spatial and temporal root dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1601–1605.

- HARMS R., SCHÄFER H.-P., KAST G., VESTE M. (2014):** Optimierung der Bildauswertung von Farbbildern aus Minirhizotronen zur Wurzelbeobachtung. Bornimer Agrartechnische Berichte: in diesem Band.
- MAJDI H., PREGITZER K., MORÉN A.-S., NYLUND J.-E., ÅGREN G.I. (2005):** Measuring fine root turnover in forest ecosystems. *Plant and Soils* 276: 32-75.
- VESTE M. (2010):** Anwendung automatischer Verfahren zur Erfassung von Wurzeln in Minirhizotron-Bildern. Bornimer Agrartechnische Berichte 73: 72-78
- VESTE M. (2012):** Anwendung von optischen Messsystemen zur nicht-destruktiven Erfassung von Wurzeln im Boden. Bornimer Agrartechnische Berichte 78: 81-89
- VESTE M., SCHÄFER H.-P., HARMS J., KAST G. (2013):** Ein neues computergesteuertes Minirhizotron-System zur Erfassung von Wurzeln. Bornimer Agrartechnische Berichte 81: 295-301.

Entwicklung eines kabelgebundenen und autonomen UAV zum Einsatz als Trägerplattform in der Landwirtschaft

Development of a cable-connected and autonomous UAV to be used as a carrier platform in agriculture

Christian Gieselmann

Insensiv GmbH, Heidsieker Heide 114, 33739 Bielefeld

Email: c.gieselmann@insensiv.de

Zusammenfassung: Unmanned aerial vehicles (UAVs) bieten durch sich immer weiter und rasant entwickelnder Technik vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Bereich landwirtschaftlicher Anwendungen. Jedoch bringt deren Einsatz auch einige Herausforderungen mit sich welche für den Anwender zu lösen sind. Insbesondere hervorzuheben sind oftmals etwa die Notwendigkeit für (externes) geschultes Personal oder zu geringe Flugzeiten (je nach Einsatzzweck). Außerdem müssen luftfahrtrechtliche Aspekte im Betrieb beachtet werden. In diesem Bericht wird das Konzept eines kabelgebundenen Copters (im Folgenden „Pod-Copter“) vorgestellt, welcher als Trägerplattform für verschiedene bildverarbeitende Systeme dient und gleichzeitig die zuvor genannten Probleme löst.

Deskriptoren: UAV, kabelgebundener Copter, Trägerplattform, Bildverarbeitung

Abstract: *Based on the rapid development of technology unmanned aerial vehicles (UAVs) offer a wide range of possible applications in the field of agriculture. However, the use of UAVs poses some challenges which have to be solved. Two points which should be mentioned in particular are the necessity to deploy skilled (external) personnel or the problem of too short flight times (depending on the intended use). Moreover aeronautical regulations have to be observed. This report presents the concept of a cable-connected copter (hereafter referred to as „Pod-Copter“) which is used as a carrier platform for various image processing systems and provides a solution for the mentioned problems.*

Keywords: UAV, cable-connected copter, carrier platform, image processing

1 Einleitung

Der heutige Stand der Technik ermöglicht den Einsatz von unbemannten Fluggeräten (sog. UAV) in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten. Viele der UAVs, die bereits kommerziell erwerblich sind, werden über eine Funksteuerung manövriert; die Stromversorgung erfolgt in der Regel über einen Akku. Letzteres bringt das Problem mit

sich, dass die Flugdauer üblicherweise 30 Minuten nicht übersteigen kann, was wiederum die Einsatzmöglichkeiten beschränkt. Die Fernsteuerung per Funk macht es außerdem notwendig, dass die meisten bisher verfügbaren UAVs von geschultem Personal bedient werden müssen, selbst wenn diese UAVs teilweise autonom fliegen. Aufgrund des oftmals vorhandenen Termindrucks in der Landwirtschaft gibt es je nach Einsatz häufig nur kleine Zeitfenster, in dem die Technik eingesetzt werden kann, hier ist die nötige Absprache der Landwirte mit externen Firmen unvorteilhaft.

Der hier vorgestellte „Pod-Copter“ soll als Hersteller unabhängige, kabelgebundene Trägerplattform für verschiedene Sensoren fungieren, um eine größtmögliche Anzahl an landwirtschaftlichen Einsatzgebieten abzudecken. Ausgestattet mit entsprechenden bildverarbeitenden Systemen könnte der „Pod-Copter“ unter anderem dazu genutzt werden, Beikraut und Wildtiere zu erfassen oder um eine Analyse des Nährstoffgehalts des Bodens durchzuführen. Darüber hinaus können beispielsweise Bestandskanten von Ackerflächen und Füllmengen von Ladefahrzeugen geprüft werden, um so eine optimale Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche beziehungsweise einen bestmöglichen Füllgrad der Ladefahrzeuge zu erreichen.

Die Kabelbindung des „Pod-Copters“ an das landwirtschaftliche Fahrzeug und dessen automatische Positionierung mittels Bildanalyse liefern die entscheidenden Vorteile, um diese Trägerplattform in möglichst vielen Szenarien nutzbar zu machen. Dadurch, dass die Stromversorgung über das Kabel von der landwirtschaftlichen Maschine erfolgt, kann das UAV den gesamten Arbeitstag über genutzt werden; Pausen aufgrund von erforderlichen Ladevorgängen und eine damit verbundene zeitliche Flugbegrenzung entfallen.

In Bezug auf rechtliche Gegebenheiten in der Luftfahrt und Handhabung ergeben sich ebenfalls Vorteile durch die Kabelbindung des Fluggerätes. Beispielsweise ist ein direkter Sichtkontakt des Betreibers zum UAV zwangsläufig gegeben; durch das Kabel werden Flughöhe und Radius begrenzt, so dass auch hier keine rechtlichen Probleme entstehen. Insgesamt werden alle derzeitigen luftfahrtrechtlichen Anforderungen mit dem „Pod-Copter“ abgedeckt. Zudem erleichtert die automatische Positionierung und Steuerung durch die eingebaute Sensorik die Handhabung, da der Betrieb ohne spezielles Personal, aeronautische Kenntnisse oder die Notwendigkeit für umfangreiches Training möglich ist.

Einmal angeschlossen begleitet das Fahrzeug den Fahrer den ganzen Arbeitstag und kann je nach Bedarf per Seilwinde ein- oder ausgefahren werden. In der Luft ermittelt der „Pod-Copter“ über eine interne Kamera und anschließender Bildverarbeitung die eigene Position relativ zum fahrenden landwirtschaftlichen Fahrzeug und passt diese automatisch an. Hierdurch wird gewährleistet, dass kein weiteres Eingreifen seitens des Fahrers nötig ist, um den „Pod-Copter“ in der Luft zu halten.

2 Technik

Wie bereits erwähnt soll der „Pod-Copter“ autonom fliegen. Hierfür wird eine Steuerung benötigt, welche die Position des UAV relativ zum Fahrzeug ermittelt. Eine Markierung auf dem landwirtschaftlichen Fahrzeug dient als Orientierungsmarke anhand dessen die interne Kamera des „Pod-Copters“, unter Umständen mit Zuhilfenahme von GPS, die eigene Position bestimmt. Die Position des „Pod-Copters“ relativ zum fahrenden Fahrzeug wird mit einer vorher festgelegten Position verglichen; diese Position kann je nach Bedarf vor, hinter oder seitlich neben dem Fahrzeug liegen. Permanente Regler führen anschließend zu einer optimalen Ausrichtung des UAV entsprechend den Anforderungen des Einsatzes. **Abbildung 1** zeigt eine mögliche Ausrichtung des „Pod-Copters“ und ein mögliches Kamerasichtfeld.

Ferner soll die Stromversorgung per Kabel erfolgen. Hierfür wird in Zusammenarbeit mit einer Hochschule eine neuartige Energieversorgung entworfen. Als Kabel kommt Aluminium zum Einsatz, was den bestmöglichen Kompromiss aus Gewicht, Leitfähigkeit und Zugfestigkeit darstellt. Das Kabel soll per Elektrowinde an das landwirtschaftliche Fahrzeug montiert werden, was eine einfache Landung durch Aufwickeln des Kabels ermöglicht. Die Elektrowinde sorgt ebenfalls dafür, dass das Kabel stets unter Spannung gehalten wird und verhindert so ein Schleifen des Kabels auf dem Boden.

Der „Pod-Copter“ wird von Haus aus mit eigens entwickelter Bildverarbeitungstechnik ausgestattet, um die Flugausrichtung vornehmen zu können, jedoch kann das System mit einer Vielzahl an Systemen erweitert werden, um den jeweiligen Einsatzanforderungen gerecht zu werden. Denkbar sind Systeme ausgestattet mit Thermografie-, Mikrowellen-, Infrarot-, Spektral- oder Lasersensorik, um nur einige Möglichkeiten zu nennen.

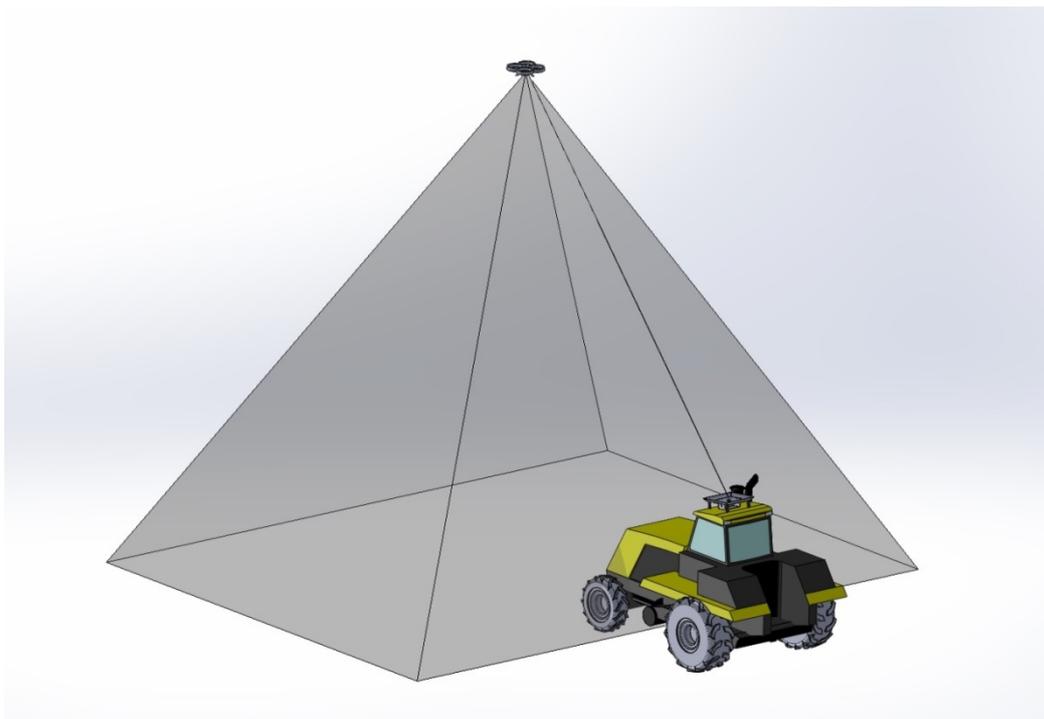


Abbildung 1: „Pod-Copter“ mit Ausrichtung vor dem Fahrzeug, beispielhaftes Kamerasichtfeld

Voraussetzungen für eine automatisierte Unkrauterken- nung aus der Luft

Michael Pflanz, Henning Nordmeyer

*Julius Kühn-Institut Braunschweig, Inst. für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Messe-
weg 11-12, 38104 Braunschweig
Email: michael.pflanz@jki.bund.de*

Die Erfassung von Unkräutern (Art und Dichte) auf Ackerflächen erfolgt in der Praxis bisher entweder durch zufällige Stichproben oder Rasterbonituren. Diese manuelle Da-
tenerhebung ist sehr arbeitsintensiv und für die landwirtschaftliche Praxis nicht geeig-
net. Für eine teilflächenspezifische Herbizidanwendung ist eine räumlich aufgelöste Un-
krautinformation jedoch zwingend erforderlich.

Seit einigen Jahren werden unbemannte Fluggeräte entwickelt, erprobt und bereits er-
folgreich zur Vegetationserkundung eingesetzt. Die photogrammetrische Flächenleis-
tung ist hierbei auf Grund der vergleichsweise geringen Flughöhe kleiner als bei Auf-
nahmen von bemannten Befliegungen oder von Satellitenbildern. Von Vorteil sind aller-
dings die hohe zeitliche Verfügbarkeit der Rohdaten, geringe Kosten und die hohe
räumliche Auflösung. Die Nutzkapazitäten der Fluggeräte reichen aus, um Kompakt-
oder hochwertige Systemkameras zu transportieren. Besonders die stabilen Flugeigen-
schaften von Multirotorfliegern (UAV) sind für Luftaufnahmen mit einfachen optischen
Systemen geeignet. Die Flächenleistung eines UAV ist im Wesentlichen abhängig von
der Flugzeit, der Flughöhe und der Brennweite der Kamera. Photogrammetrische Me-
thoden zur automatisierten Unkrauterfassung mit UAVs aus geringen Flughöhen sind
bisher nur unzureichend wissenschaftlich untersucht worden.

Ein Hexakopter wurde mit einer modifizierten handelsüblichen Kamera (Sony alpha
NEX-5N, 60 mm Brennweite) ausgestattet und es erfolgten Messflüge über verunkraut-
teten Versuchsflächen des Julius Kühn-Instituts in Braunschweig. Die Flughöhe war auf
5 m festgelegt. Zeit- und ortsgleich erfolgten manuelle Feldbonituren (Zählrahmen =
0,25 m²) an insgesamt n = 108 Punkten. Bezüglich der räumlichen Auflösung wurden
anschließend verschiedene Unkrautarten in den Kopterbildern manuell am PC ausge-
zählt (HerbCountGUI Ver. 0.1, Matlab 2010a, The MathWorks, USA) und mit den Boni-
turdaten verglichen.

Unsere Erfahrungen zeigen, dass für eine Unkrautkontrolle mit Hilfe von unbemannten
Fluggeräten räumlich hochaufgelöste Bilder erforderlich sind. Bei einer Flughöhe von
5 m und einer fest eingestellten Brennweite von 60 mm war die Abbildungsleistung der
Kamera ausreichend hoch, um auch kleine Strukturen im Bild deutlich voneinander ab-
grenzen zu können. Durch die manuelle Bewertung der georeferenzierten Einzelbilder
konnten Unkrauthäufungen im Gesamtbestand identifiziert werden. Der Zusammen-
hang zur manuellen Feldbonitur war hierbei hoch korreliert ($R^2 = 0,7$), was darauf hin

deutet, dass die Bildaufnahmen ausreichend Informationen für eine Objektbasierte automatisierte Bilderkennung haben. Allein auf der Basis von Farbabweichungen war eine Differenzierung zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern in den vorliegenden Versuchen nicht möglich. Die raumbezogenen Informationen wurden bei der Applikation von Herbiziden auf ausgewählten Standorten berücksichtigt.

ISense PCF: The use of RPAS for the development of a methodology to assess the crop status in space and time quantitatively

Koen C. Mertens, Peter Lootens, Tom De Swaef, Filip De Brouwer, Kurt Heungens, Jonas Aper, Alex De Vliegheer, Joost Baert, David Nuyttens, Isabel Roldán-Ruiz, Jürgen Vangeyte

*Institute for Agricultural and Fisheries Research (ILVO),
Burg. Van Gansberghelaan 115, 9820 Merelbeke, Belgium,
Email:koen.mertens@ilvo.vlaanderen.be*

Abstract: *ISense, a new ILVO project, aims to establish a transdisciplinary framework and visible pool of expertise regarding sensor technology. Its purpose is the detection and evaluation of sensor technology from different disciplines for use in agriculture. In this project three cases will be developed: Precision Crop Farming (PCF), Precision Livestock Farming (PLF) and Biosensors.*

Keywords: *RPAS, UAV, UAS, high resolution images, crop status, algorithm development, farmer, breeder, management, decision support*

The PCF case will explore the practical applicability of RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) technology with the appropriate sensors for the farmer and breeder. In practice, taking into account geospatial variability shows great potential. The number of cost-efficient non-destructive tools for the monitoring of biomass, biotic and abiotic stress for the farmer is currently inadequate. The use of these tools, in combination with GIS, GPS and remote sensing allows to tune nutrient, disease and water management to take into account variability in and between parcels. The technology to work location-dependent is available, but the information and management tools are lagging behind. For grassland management and potato production specifically, there is a need for objective plant-physiology based criteria, allowing crop evaluation in a quick and objective manner with a high resolution. Therefore, the PCF case will use RPAS for the development of a methodology to assess the evaluation of crop status in space and time.

Objective and frequent observations via RPAS should allow a focused management of crops leading to an optimized yield, quantitatively as well as qualitatively, with respect for the environment, and should support breeders with the selection of genotypes in breeding experiments. Within the PCF case, we will therefore focus on three different applications: (i) the monitoring of biomass in grasses, (ii) the evaluation of drought stress in fodder grass, and (iii) the detection of soil-borne diseases in potato. A multi-copter (12 rotors) platform together with a VIS camera and hyperspectral mosaic snapshot sensors (VIS+NIR) have already been acquired.

20. Workshop
Computer-Bildanalyse und Sensorik in der Landwirtschaft

26. Mai 2014, Osnabrück

Optische Sensorik an Multikoptern

Matthias Marks, Falk Schmidsberger, Frieder Stolzenburg

Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik, Friedrichstraße 57-59,
38855 Wernigerode

Email: mmarks@hs-harz.de, fschmidsberger@hs-harz.de, fstolzenburg@hs-harz.de

Zusammenfassung: Der erfolgreiche Einsatz von Multikoptern zur Bildverarbeitung in der Landwirtschaft und darüber hinaus stellt hohe Anforderungen an die Hard- und Software, die den Einsatz komplexer Sensorik nach sich zieht: Die Sensoren können zum einen die Navigation des Flugroboters unterstützen; hierzu zählen Lage-, Beschleunigungs- und GPS-Sensoren sowie eine Stereokamera. Zum anderen dienen Sensoren zur Messung und Erfassung von Umweltdaten; dazu zählen Thermal-, Nah-Infrarot-, Foto- und Videokameras. Durch eine Kombination der verschiedenen Sensordaten lassen sich eine automatische Flugplanung, eine genaue Positionsbestimmung und die Erkennung und Verortung bekannter Objekte realisieren. Für die Messung und Datenerfassung sind verschiedene komplexe Sensoren nutzbar, die im Folgenden näher erläutert werden.

Deskriptoren: Multikopter, Computer Vision, Wärmebild, Nahinfrarot

Abstract: *The successful use of multicopters for image processing in agriculture and beyond sets high demands on the hardware and software, which leads to the use of complex sensor systems: There are sensors which support navigation of a flying robot; this includes position, acceleration and GPS sensors and a stereo camera. In addition, sensors can be used to measure and record environmental data; these include thermal, near-infrared, photo and video cameras. The combination of different sensor data lays the basis for an automatic flight planning, realizing accurate position determination and the recognition and localization of known objects. For measuring and data collection, various complex sensors are used, which are described in more detail in this paper.*

Keywords: *multicopters, computer vision, thermal imaging, near-infrared*

1 Überblick

Das Labor Mobile Systeme an der Hochschule Harz setzt in Projekten verschiedene Sensoren an Multikoptern ein. Der GPS-Sensor zum Beispiel wird benötigt, um die aktuelle Position zu bestimmen und somit koordiniertes Fliegen zu ermöglichen. Des Weiteren werden verschiedene Kamerasysteme eingesetzt: Neben einer gewöhnlichen Digitalkamera sind dies eine Stereokamera und Infrarotkameras für Wärmebild- bzw. Nahinfrarotaufnahmen.

Mit Hilfe der Stereokamera können Entfernungsmessungen während des Flugs erfolgen und Höhenprofile erstellt werden. Zum Einsatz kommen hier einfache Webcams und sogenannte Actionkameras. Um Ungenauigkeiten im Aufbau und die Abbildungsfehler der Linsen der einzelnen Kameras zu korrigieren, ist es notwendig, diese zu kalibrieren und ein Modell der Stereokamera zu erstellen. Aus den Abständen der korrespondierenden Punkte in beiden Bildern wird durch Triangulation die Entfernung zwischen der Kamera und den jeweiligen Punkten berechnet.

Als weiterer Sensor kommt eine Wärmebildkamera vom Typ FLIR Tau2 336 (FLIR 2013) zum Einsatz. Die einzelnen Aufnahmen müssen zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden, bevor eine Bildanalyse erfolgen kann. Für Anwendungen in der Landwirtschaft werden Nahinfrarot-Kameras eingesetzt. Diese können sehr erfolgreich zur Vegetations- und Wachstumsanalyse von Agrarflächen sowie im Precision Farming eingesetzt werden. Die Technologie dieser Kameras ist ähnlich wie die von Digitalkameras für den sichtbaren Bereich. Darum ist es mit derartigen hochwertigen Kameras bei vertretbarem Aufwand gut möglich, durch das Zusammenfassen der Nahinfrarot-Einzelbilder zu einem Orthofoto (durch Stitching) sich einen Überblick auch über größere Flächen zu verschaffen.

2 Stereokamera

Mit Stereokameras können live Entfernungsmessungen während des Flugs erfolgen und Höhenprofile erstellt werden. Zum Einsatz kommen hier sogenannte Actionkameras (**Bild 1**) sowie einfache Webcams (**Bild 2**). Die Kameras sind mit jeweils unterschiedlichen Basisbreiten für verschiedene Entfernungsbereiche angeordnet. Ungenauigkeiten im Aufbau der Stereokamera und die Abbildungsfehler der Linsen (Linsendistorsionen) der einzelnen Kameras werden durch eine Kalibrierung korrigiert und beide Bilder jeweils rektifiziert. Aus den Unterschieden in den beiden korrespondierenden Bildern wird durch Triangulation die Entfernung zwischen der Stereokamera und den jeweiligen Objekten im Bild berechnet und in einer Tiefenmap gespeichert (LAUTERBACH 2013). In **Bild 2** ist die Tiefenmap mittels Graustufen visualisiert. Je heller die Darstellung, desto näher ist das Objekt an der Kamera. Mit der Tiefenmap und der bei der Kalibrierung der Stereokamera berechneten Reprojektionsmatrix werden für jeden Pixel die 3D-Koordinaten berechnet und in einer 3D-Punktewolke gespeichert. Mittels einer Serie von Stereobildern und den daraus resultierenden 3D-Punktewolken können schließlich 3D-Objektmodelle, 3D-Umgebungsmodelle und Höhenprofile erstellt werden.



Bild 1: Multikopter der Hochschule Harz mit montierter Stereokamera (2 Actionkameras)

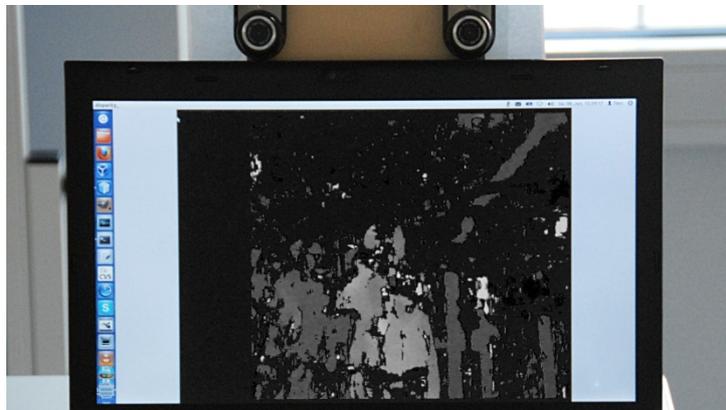


Bild 2: Stereokamera realisiert mit Webcams, Darstellung der Entfernung durch Graustufen

Mit Hilfe der Semantischen Objekterkennung werden schließlich Objekte in digitalen Bildern anhand gelernter Modelle detektiert (SCHMIDBERGER & STOLZENBURG 2013A und B). Die Kombination von Stereo-Sehen und Objekterkennung ermöglicht die genaue Befliegung bekannter Objekte (Gebäude, Grundstücke, Felder, Windräder, Fahrzeuge etc.) aus definierten Abständen durch das sogenannte Visual Docking.

3 Wärmebildkamera

Aufnahmen einer Wärmebildkamera unterscheiden sich grundsätzlich von Bildern, die mit gewöhnlichen Kameras gemacht wurden, da hier für das menschliche Auge nicht sichtbare Strahlung dargestellt werden muss. Der Sensor der Wärmebildkamera erfasst die Wärmestrahlung im Bereich von 7.500 bis 13.500 nm Wellenlänge. Die Darstellung der verschiedenen Temperaturen erfolgt entweder in Falschfarben oder in Graustufen. Die verwendete Kamera kann Bilder mit einer Auflösung von 320x240 Pixeln aufnehmen. Da herkömmliche Verfahren der Bildverarbeitung (z.B. Kantendetektion) sich bei Infrarotaufnahmen aufgrund der weniger scharfen Konturen weniger gut eignen, sind hier Verfahren der Photogrammetrie und Semantischen Bildanalyse (Objekterkennung)

mit Methoden der Künstlichen Intelligenz, insbesondere dem Maschinellen Lernen (BERRY & LINOFF 2011), zu kombinieren, um verknüpfte Aufnahmen zu erstellen.

Bild 3 zeigt die Wärmebildkamera im Einsatz am Multikopter. Neben der Kamera wurde ein Raspberry Pi angebracht, um die Aufnahme zu steuern und die aufgenommenen Bilder zu speichern.



Bild 3: Multikopter der Hochschule Harz mit montierter Wärmebildkamera

Bild 4 (Auflösung 1099x436 Pixel) zeigt eine Wärmebildaufnahme eines Parkplatzes der Hochschule Harz. Zur Erzeugung dieses zusammengesetzten Bildes wurden ca. 300 Einzelbilder verwendet. Aufgrund der geringen Auflösung der Kamera benötigt man diese große Anzahl an Einzelbildern. Der Temperaturverlauf folgt hier dem Schema schwarz (kalt) bis weiß (warm).



Bild 4: Zusammengesetztes Wärmebild eines Parkplatzes

4 Nahinfrarot-Kamerasystem

In laufenden Projekten wird zurzeit ein Kamerasystem mit zwei Kameraköpfen vom Typ VCSCB der Firma VISION COMPONENTS (2014, **Bild 5**) verwendet und weiterentwickelt. Mit diesem Kamerasystem lassen sich parallel zwei Bilder mit einer Auflösung von jeweils 2048x1088 Pixeln erzeugen. Der Frequenzbereich eines Kamerakopfes wird mit Hilfe eines IR-Durchlassfilters auf Wellenlängen > 700 nm beschränkt. Der andere Kamerakopf verwendet einen IR-Sperrfilter und erzeugt somit Bilder im sichtbaren Bereich (VIS). Hier handelt es sich um eine sogenannte Smart-Kamera, das bedeutet, sie ver-

fügt über einen internen Prozessor. Somit ist es möglich, bereits während einer Befliegung Bildanalysen vorzunehmen, z.B. mit Software, die auf Basis von OpenCV (BRADSKI & KAEHLER 2013), einer frei verfügbaren Softwarebibliothek zur Bildverarbeitung, implementiert werden kann.



Bild 5: Prototyp des Smart-Kamera-Systems

Ein klassisches Einsatzgebiet von Nahinfrarot-Aufnahmen im Bereich der Landwirtschaft ist die Analyse von Vegetation. Ein sehr häufig angewandter Index zur Beurteilung der Vegetation ist der „Normalized Differenced Vegetation Index“ (NDVI) (WEIER & HERRING 2000), der auf Basis von Aufnahmen im VIS- bzw. NIR-Bereich berechnen lässt.

Bild 6 zeigt einen Vergleich der beiden Kameraaufnahmen. So lässt sich z.B. auf dem rechten Bild die Rasenfläche aufgrund des hohen Reflexionsgrads sehr gut erkennen. Ein weiteres mögliches Einsatzgebiet von Nahinfrarot-Kameras ist die Archäologie. Durch die Detektion von Schwarzerde auf den Aufnahmen lassen sich Stellen identifizieren, an denen Ausgrabungen Aussicht auf Erfolg haben.



Bild 6: Aufnahme im VIS- (links) bzw. NIR-Bereich (Mitte) und das Differenzbild (rechts)

5 Integration der Sensorik in einem Flugassistenzsystem

Zur Entlastung des Piloten bei der Navigation werden alle Sensordaten in einem Flugassistenzsystem an der Bodenstation zusammengefasst. Dieses Flugassistenzsystem bietet die Möglichkeit, Informationen zur Navigation des Flugroboters zu erhalten. In der Planungsansicht ist es möglich, eine Wegpunktbefliegung entlang einer Liste von GPS-Koordinaten zu planen und durchzuführen (**Bild 7**). Das Flugassistenzsystem ist modular aufgebaut und sieht je nach Konfiguration die Möglichkeit vor, verschiedene Sensordaten anzeigen zu lassen, und zwar nur die im jeweiligen Anwendungsfall relevanten.

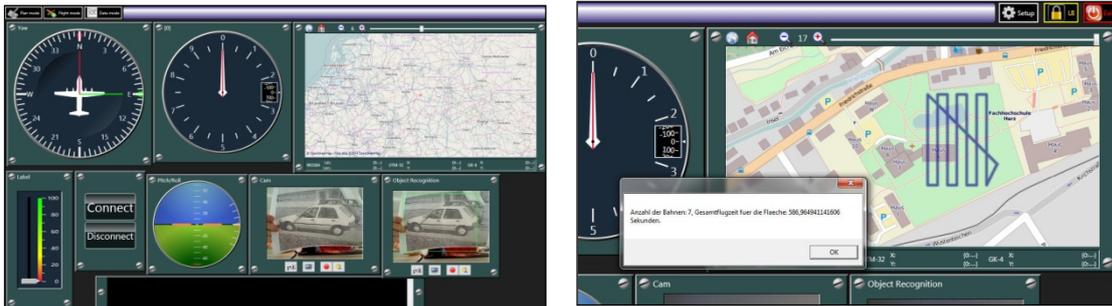


Bild 7: Das Flugassistenzsystem einschließlich koordinierter Wegpunktbefliegung

Die Befliegung größerer Areale, wie dies bei landwirtschaftlichen Flächen häufig der Fall ist, führt schnell zu vergleichsweise langen Flugzeiten (teilweise mehr als 1h), da langsam (etwa mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s) und in eng nebeneinander liegenden Bahnen (wegen der zum Teil geringen Kameraauflösung) geflogen werden muss. Daher ist im Flugassistenzsystem eine koordinierte Befliegung größerer Areale durch mehrere Multikopter vorgesehen. Hierbei sind mindestens zwei Szenarien zu unterscheiden:

1. Es soll ein großes, in der Regel rechteckiges Areal abgeflogen werden.
2. Es ist eine größere Menge von Wegpunkten, die inspiziert werden sollen, der Reihe nach anzufliegen.

Das Flugassistenzsystem teilt in ersterem Fall jedem der verfügbaren Multikopter eine Wegpunktliste zu, die das zu überfliegende Areal in mehrere Teile partitioniert. Den Multikoptern wird dann jeweils eine entsprechende Wegpunktliste zugewiesen. Damit die Anzahl der Wendemanöver möglichst klein gehalten wird, werden rechteckige Areale dabei der Länge nach aufgeteilt. **Bild 8** zeigt den zugehörigen Algorithmus als Pseudocode. Das zweite Szenario führt zu einem informationstechnisch komplexen Problem, das eine Erweiterung des (NP-vollständigen) Rundreiseproblems darstellt. Der vorgesehene Algorithmus (**Bild 8**) errechnet daher nicht die global optimale Lösung, aber eine hinreichende Annäherung. Dabei fliegt jeder Multikopter jeweils den nächstgelegenen, noch nicht von einem anderen Multikopter besuchten Wegpunkt an.

```

k : Anzahl der Kopter
v : Geschwindigkeit der Kopter (für alle gleich)
t : Verweilzeit an einem Punkt (konstant)
w[Kopter] : Wegpunktliste für den jeweiligen Kopter

// Koordiniertes Befliegen eines (rechteckigen) Areals
d : Reihenabstand (benutzerdefiniert)
(p, a, b) = Rechteck mit größtmöglicher Länge der Seite a (Vektor) und Eckpunkt p
Reihen = |b|/d/k; // Anzahl zu befliegender Reihen je Kopter (aufrunden)
Offset[Kopter](p+b*Kopter); // jeder Kopter startet an anderer Position

for (i=0;i<Reihen;i++) {
    if (i gerade) {
        w[Kopter].add(Offset[Kopter]+i*b/d);
        w[Kopter].add(Offset[Kopter]+i*b/d+a);
    } else {
        w[Kopter].add(Offset[Kopter]+i*b/d)+a;
        w[Kopter].add(Offset[Kopter]+i*b/d);
    }
}

// Koordiniertes Befliegen einer Menge von Wegpunkten
n : Anzahl der Wegpunkte
Position[k] = Startpunkt[k]; // Start- und Zielposition der Kopter
Strecke[k] = 0; // zurückgelegte Strecke
Besucht[n] = false; // noch kein Wegpunkt besucht
for i, j < n { // Abstandsmatrix der Wegpunkte berechnen
    Abstand[i][j] = v*dist(i, j)+t;
}
for n { // alle Wegpunkte bearbeiten
    // finde die kleinstmögliche Wegverlängerung für einen der Kopter
    // über einen noch nicht besuchten Wegpunkt:
    (Kopter, Wegpunkt) = argmin (Strecke[Kopter]+Abstand[Position[Kopter]]
        [Wegpunkt]+Abstand[Wegpunkt][Startpunkt[Kopter]])
    where Besucht[Wegpunkt] = false;
    Strecke[Kopter] += Abstand[Kopter][Wegpunkt];
    w[Kopter].add(Wegpunkt); // neuen Wegpunkt hinzufügen
    Besucht[Wegpunkt] = true;
}

```

Bild 8: Pseudocode zur koordinierten Wegpunktbefliegung

6 Schlussbemerkungen und Ausblick

Durch die Kombination komplexer Sensoren in Verbindung mit einer Flugplanung innerhalb eines Flugassistenzsystems wird der Einsatz von Multikoptern auf vielen Anwendungsgebieten ermöglicht bzw. vereinfacht. Noch effizienter wird dies durch eine koordinierte Befliegung mit mehreren Multikoptern. Die Entfernungsmessung mit Stereokameras in Verbindung mit der semantischen Objekterkennung ermöglicht die Erkennung, die Verortung und die genaue autonome Befliegung gelernter Objekte in definierten Abständen durch das sogenannte Visual Docking.

Im Labor Mobile Systeme der Hochschule Harz werden die vorgestellten Algorithmen und Methoden im Zusammenspiel mit verschiedenen Sensorkombinationen weiterentwickelt und implementiert.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden bzw. werden teilweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) in den Projekten *AirMeter*, *InfraKopter* und *InspektoKopter* gefördert (Förderkennzeichen: *KF 2488207HM1*, *KF 2488210LF2* und *16KN021923*). Wir danken auch unseren studentischen Kräften an der Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik, insbesondere Marc Czeszewski, Alexander Johr und Niels-Hendrik Klopsch, für ihre Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- BERRY M.J.A., LINOFF G. (2011):** Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management. John Wiley & Sons Inc., 3rd edition
- BRADSKI G.R., KAEHLER A. (2013):** Learning OpenCV – Computer Vision in C++ with the OpenCV Library, O’Reilly, 2nd edition, Early Release Ebook
- FLIR (2013):** FLIR Tau 2 Uncooled Cores, Dezember 2013, URL: <http://www.flir.com/cvs/cores/view/?id=54717>
- LAUTERBACH H.A. (2013):** Stereo-Optische Abstandsmessung für einen autonomen Quadrocopter, Bachelorarbeit, Universität Würzburg
- PCL (2013):** The Point Cloud Library, Dezember 2013, URL: <http://pointclouds.org>
- SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG F. (2013A):** Semantic Object Recognition with Segment Faces. In Marco Ragni, Michael Raschke und Frieder Stolzenburg, Hrsg., Proceedings of the KI 2013 Workshop on Visual and Spatial Cognition, Seiten 21–28, Koblenz, 2013. CEUR Workshop Proceedings 1055
- SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG F. (2013B):** Semantische Objekterkennung mit Methoden des Maschinellen Lernens. In Robin Gebbers und Manuela Zude, Hrsg., Proceedings 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Seiten 179–186, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2013. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 81
- VISION COMPONENTS (2014):** VCSBC quadro Smart-Kamera, URL: <http://www.vision-components.com/produkte/smart-kameras/vc-board-cam/>
- WEIER J., HERRING D. (2000):** Measuring Vegetation (NDVI & EVI), URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

Automatische Auswertung von Überholvorgängen aus Luftbildaufnahmen mit dem UAS HORUS

Tom Hößler¹, Lucas Günther², Frank Steinert¹

¹ Airclip GmbH, Pohlandstr. 5, 01309 Dresden

² Fraunhofer IVI Dresden, Zeunerstraße 38, 01069 Dresden
Email: lucas.guenther@airclip.de

Zusammenfassung: Unfälle im Verlauf von Überholvorgängen auf Landstraßen sind durch eine besonders hohe Unfallschwere gekennzeichnet. Daher sollte stets im Einzelfall geprüft werden, wo das Befahren des Gegenverkehrsfahrestreifens aus Verkehrssicherheitsgründen nicht zugelassen werden kann. Dabei spielt die Mindestüberholsichtweite eine wichtige Rolle. Die Ermittlung dieser Größe erfolgt auf der Grundlage eines Überholmodells, welches derzeit weitgehend auf Untersuchungen aus den 1980er Jahren basiert. Die darin verwendeten Eingangsgrößen sind jedoch aufgrund der zwischenzeitlichen Fahrzeugentwicklung nicht mehr aktuell. Aus diesem Grund wird anhand von geometrischen und fahrzeugtechnischen Eingangsparametern ein aktualisiertes Überholmodell in Abhängigkeit von verschiedenen Randbedingungen entwickelt. Die für die Erstellung des Überholmodells notwendigen Daten werden mithilfe dem ferngelenkten UAS HORUS erfasst.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine automatisierte Auswertung der aufgenommenen Luftbildsequenzen realisiert, die die Trajektorien der Fahrzeuge insbesondere während Überholvorgängen liefert. Um die abgebildeten Fahrzeuge in den Einzelbildern zu erkennen und deren Positionen bestimmen zu können, kommen Methoden der Photogrammetrie und Bildverarbeitung zum Einsatz. Die Kalibrierung der Messkamera ermöglichte die Transformation der Bildkoordinaten in Weltkoordinaten. Dabei wurde ein Modell des vollständigen Abbildungsvorganges formuliert und die Messunsicherheiten der Ergebnisgrößen untersucht.

Das verwendete Messsystem und die entwickelten Algorithmen können für weitere Untersuchungen wie beispielsweise in gefährlichen Kreuzungsbereichen oder großen Verkehrsknotenpunkten eingesetzt werden

Deskriptoren: Oktokopter, Photogrammetrie, UAS, Überholvorgänge, Verkehrssicherheit

Abstract: *Accidents in the course of overtaking manoeuvres on rural roads are characterized by a particularly high severity. Therefore, it has to be decided where driving on the oncoming traffic lane can not be allowed due to traffic safety. In this context, the overtaking sight distance is an important quantity, which can be derived from a model of overtaking manoeuvres. The current model is largely based on studies from the 1980s.*

The used input variables are obsolete because of the recent development of vehicles. For this reason, an updated model of overtaking maneuvers depending on various boundary conditions is developed. The model is based on data collected using a hovering remote controlled ultra-light sensor platform (HORUS).

In this project an automated evaluation of the recorded aerial image sequences has been realized, which provides the trajectories of the vehicles especially during overtaking. Methods of photogrammetry and image processing are used to detect the vehicles shown and to determine their position. Camera calibration was necessary in order to transform image coordinates into world coordinates. In this regard, a projection model was formulated and the measurement uncertainties of the output quantities were examined.

The used measuring system and the developed algorithms can be applied to further traffic analysis such as studies of dangerous crossing areas as well as major transport hubs.

Keywords: *octocopter, overtaking, photogrammetry, traffic safety, UAS*

1 Einleitung

„Hebt man den Blick, so sieht man keine Grenzen.“ - japanisches Sprichwort -

Diese Lebensweisheit trifft auch auf das Ingenieurwesen zu, denn der Einsatz innovativer Messsysteme kann helfen, bestehende Grenzen zu überwinden. Beispielsweise erlauben UAS (Unmanned Aerial Systems) neue Perspektiven für die Erfassung von Messdaten und Bildaufnahmen. Aus diesem Grund wurde am Dresdner Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme in Kooperation mit der Airclip GmbH die schwebende Sensorplattform HORUS („HOVering Remote controlled Ultra-light Sensor platform“) entwickelt.

Eine Anwendung für solch ein UAS ist ein gemeinsames Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen, des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden sowie des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme. Dabei kommt das UAS HORUS zum Einsatz, um Luftbildsequenzen von Überholvorgängen auf Landstraßen aufzunehmen. Die erfassten Daten dienen der Aktualisierung eines Überholmodells, das beispielsweise zur Ermittlung der Mindestüberholstrecke verwendet wird. Daraus lassen sich Empfehlungen ableiten, unter welchen Bedingungen das Überholen verboten werden sollte oder die Anordnung eines Zusatzfahrstreifens sinnvoll ist.

Um die Aktualisierung des Überholmodells zu unterstützen, soll in diesem Projekt ein Algorithmus zur automatischen Auswertung der Luftbildsequenzen vorgestellt werden, der bereits verwendet wird, um die Trajektorien der Fahrzeuge zu ermitteln. Mithilfe von Methoden der Bildverarbeitung werden dabei die erfassten Fahrzeuge erkannt und de-

ren Weltkoordinaten photogrammetrisch bestimmt. Um ein Modell des gesamten Abbildungsvorganges zu formulieren, wird ausgehend von den theoretischen Grundlagen eine geeignete Kamerakalibrierung durchgeführt. Abschließend wird der implementierte Algorithmus anhand exemplarischer Luftbildaufnahmen demonstriert.

2 Messsystem

Für die Aufzeichnung der Bildsequenzen von Überholvorgängen auf Versuchsstrecken sind die folgenden Anforderungen für eine erfolgreiche Versuchsdurchführung erfüllt (LIPPOLD *et al.* 2013):

- Erfassung von Zeitdauer und zurückgelegter Wegstrecke von allen am Überholvorgang Beteiligten (Überholter, Überholer, Entgegenkommender) sowie daraus abgeleitete Geschwindigkeiten und Beschleunigungen,
- kontinuierliche Aufnahme der Messwerte für alle am Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge,
- Einsehbarkeit großer Abschnittslängen von mindestens 600 m,
- von den Fahrern nicht wahrnehmbare und das Fahrverhalten nicht beeinflussende Messtechnik.

Die Sensorplattform HORUS kann je nach Anforderung mit 4, 8 oder 12 Motoren betrieben werden. Der 1,0 m × 1,3 m große Kopter ist selbstständig in der Lage, eine programmierte Position GPS-gestützt anzufliegen und über die Dauer der Messung zu halten. Die H-förmige Geometrie des Rahmens ermöglicht eine beliebige Anordnung der Nutzlasten bzw. Flugakkus, sowie das schnelle Austauschen verschiedenster Sensorikmodule. **Bild 1** zeigt die Oktokoptervariante des HORUS (AIRCLIP 2014).

Für die Messung wird HORUS mit einem aktiven nick- und rollkompensierten Kameramodul ausgestattet. Die Kamerahalterung gleicht die Nick- und Rollbewegungen des Kopters genau so aus, dass die montierte Kamera während der Messdatenerfassung einen konstanten Aufnahmewinkel hält.



Bild 1: Oktokoptervariante des HORUS mit Kameramodul

Als Messstrecken wurden durch das Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden lange Geraden mit großen Sichtweiten zwischen 500 m und 700 m ausgewählt.

Die bisherige Messdatenerfassung fand an 11 Tagen im Zeitraum von Juli bis September 2013 statt, dabei konnten insgesamt über 600 Überholvorgänge aufgezeichnet werden. Weitere Messungen werden im zweiten Quartal 2014 in Bayern durchgeführt.

Aufgrund der Tatsache, dass die maximale Flughöhe des HORUS ca. 250 m beträgt und der zu erfassende Straßenabschnitt von einem Punkt aus dieser Höhe erfasst werden soll, ist ein Objektiv mit geringer Brennweite erforderlich und eine Kalibrierung der Messkamera notwendig. Eine Kalibrierung bezeichnet die Ermittlung der internen und externen Kameraparameter und ermöglicht somit die Transformation der Pixelkoordinaten in die Weltkoordinaten eines abgebildeten Objektes.

3 Bestimmung der Kameraparameter

Die Bestimmung der internen Kameraparameter erfolgte am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden in einem Raum, der speziell für die Kalibrierung von Fischaugen-Objektiven eingerichtet wurde. An den Wänden und der Decke befinden sich 140 Messpunkte, deren Objektkoordinaten mit einer Standardabweichung von maximal 0,23 mm bekannt sind (SCHNEIDER *et al.* 2009). **Bild 2** zeigt ein Bild des Kalibrierraums, das von einer Kamera mit Fischaugen-Objektiv aus der Raummitte nach oben aufgenommen wurde. Der vergrößerte Ausschnitt veranschaulicht die Codemarken, die eine automatische Identifikation erlauben. Die externen Kameraparameter definieren die eindeutige Transformation des Objektkoordinatensystems in das Kamerakoordinatensystem und wurden für die Messungen jeweils definiert.

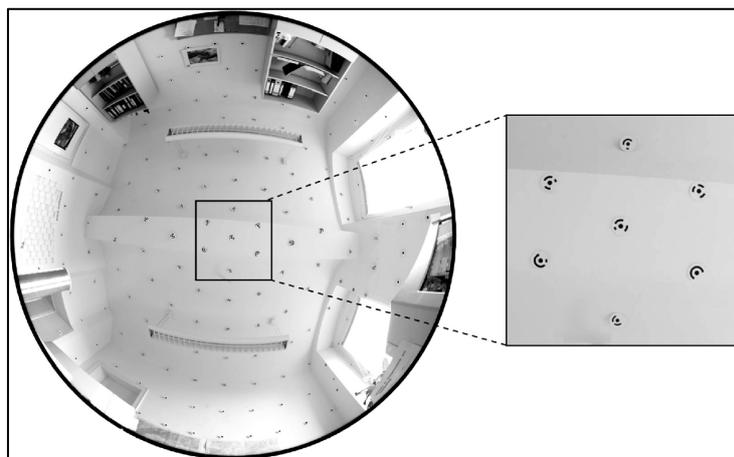


Bild 2: Kalibrierraum am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden.

4 Algorithmus zur automatischen Auswertung von Luftbildern

Ziel des Vorhabens ist die Implementierung eines Algorithmus, welcher ausgehend von Luftbildern die Positionen von Fahrzeugen im Weltkoordinatensystem ermittelt. Dabei sind Überholvorgänge von besonderem Interesse, denn anhand der ermittelten Fahrzeugtrajektorien wird am Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der Technischen Universität Dresden ein Modell für das Überholverhalten von PKW-Fahrern erstellt. Die auszuwertende Datenmenge von mehr als 600 Überholsequenzen erfordert eine weitest gehende Automatisierung. Die automatische Auswertung der Luftbilder kann in zwei Schritten erfolgen, die in **Bild 3** schematisch dargestellt sind. Mittels Methoden der Bildverarbeitung werden für $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ die Positionen $X^{(i)}, Y^{(i)}$ aller n Fahrzeuge in jedem Einzelbild bestimmt. Ein Nachbearbeitungsprozess fasst die Ergebnisse zu den gesuchten Trajektorien zusammen.

Die Algorithmen der Bildverarbeitung werden in der Entwicklungsumgebung Halcon realisiert (HALCON 2011) Nach der Berechnung der unverzeichneten Bilder ist eine Stabilisierung nötig, da die Bewegungen des HORUS kompensiert werden müssen. Die anschließende Hintergrund-Schätzung ermöglicht das Erkennen von Fahrzeugen. Mithilfe von Matlab werden im Rahmen der Nachbearbeitung Fehldetektionen entfernt und die verbliebenen Koordinaten den entsprechenden Fahrzeugen zugeordnet.

Die resultierenden Trajektorien können beispielsweise zur Formulierung eines mathematischen Überholmodells weiterverarbeitet werden. Die detaillierte Arbeitsweise des Algorithmus zur automatischen Auswertung von Luftbildern wird im Folgenden vorgestellt.

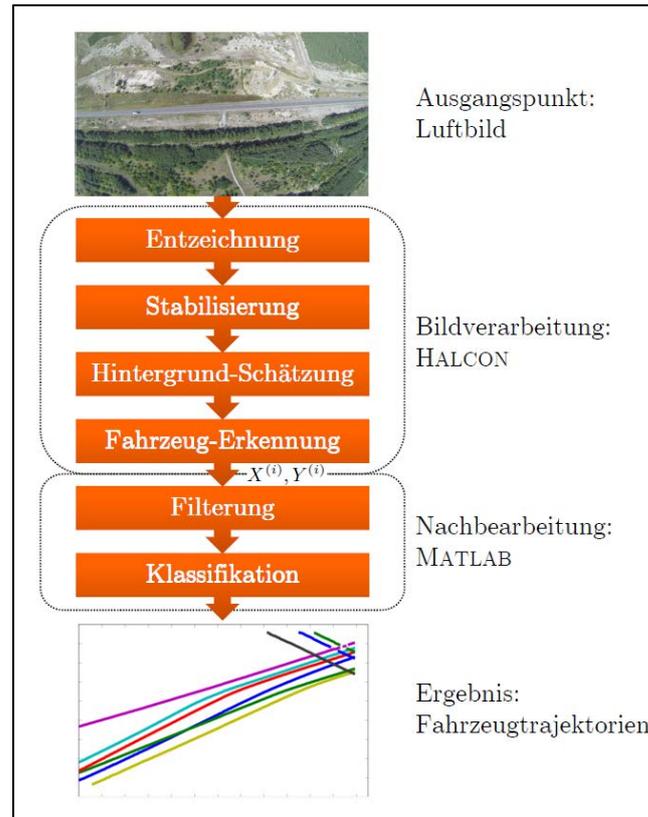


Bild 3: Algorithmus zur Auswertung von Luftbildern

5 Entzeichnung

Der Begriff der Entzeichnung beschreibt die Korrektur von Verzeichniseffekten. Das resultierende Bild entspricht dem linientreuen Modell der Zentralprojektion. Dieser Vorgang erleichtert die Weiterverarbeitung, da Form und Größe der abgebildeten Objekte unabhängig von der Position im Bild sind. Die Entzeichnung wurde in der Entwicklungsumgebung Halcon umgesetzt, die beliebige Verzerrungen unterstützt. Nach der Generierung eines regulären Gitters, welches die Geometrie des zentralprojektiven Bildes repräsentiert, wird jeder Gitterpunkt verzeichnet. Mithilfe der resultierenden Koordinaten und Informationen über die Größe des Punktgitters sowie den ursprünglichen Gitterabstand kann eine Abbildungsvorschrift erstellt werden, die die Entzeichnung realisiert (HUGHES *et al.* 2010). Die Grauwertzuweisung erfolgt für jedes Pixel im Ausgabebild durch die bilineare Interpolation. Dabei werden die vier benachbarten Grauwerte einer berechneten Pixelposition in die Interpolation einbezogen. **Bild 4** demonstriert die Entzeichnung an einem Beispiel. Das in **Bild 4a** dargestellte Bild zeigt deutliche Effekte der tonnenförmigen Verzeichnung durch das Fischaugen-Objektiv, denn Bereiche am Bildrand wirken gestaucht. Daher werden auch die Straße und Fahrzeuge am Rand kleiner abgebildet als im Zentrum. Das rot markierte Punktgitter dient der Berechnung des entzeichneten Bildausschnittes in **Bild 4b**. Ein konstanter Gitterabstand von 200 Pixel wird erzeugt. Die ebenso transformierten Gitterpunkte verdeutlichen, dass die Bereiche am

Bildrand gestreckt werden. Folglich kommt es im Randbereich zu Unschärfe, die die weitere Auswertung allerdings nicht beeinträchtigt. Das entzeichnete Bild ist mit 6200 Pixeln um den Faktor 1,6 breiter als das ursprüngliche Bild. Ausgehend vom entzeichneten Einzelbild ist die Transformation in Weltkoordinaten möglich. Der Messbereich umfasst im Rahmen dieses Projektes die Abbildung einer Straße, die im Vergleich zu der gesamten Projektionsfläche eine geringe Breite aufweist.

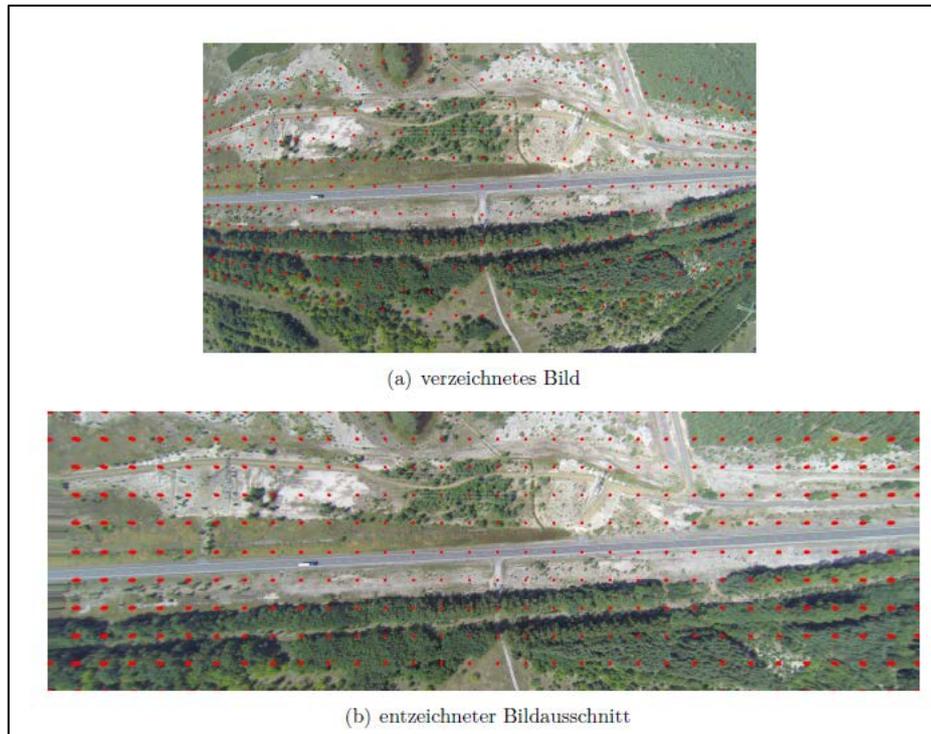


Bild 4: Beispiel Entzeichnung

6 Stabilisierung

Im Gegensatz zu einer stationären Kamera lassen sich leichte Bildbewegungen trotz roll- und nickkompensierter Aufhängung der Kamera bei der Nutzung eines Multirotor-UAS nicht vermeiden. Diese müssen durch eine Stabilisierung des Bildes weitestgehend kompensiert werden, um eine Bestimmung von Fahrzeugpositionen zu ermöglichen. Dabei sind die Verschiebungen und Drehungen der Bilder zueinander zu bestimmen und zu korrigieren. Ein möglicher Ansatz ist das Erkennen und Ausrichten von Bereichen am Straßenrand, die sich über die Messdauer nicht ändern. Um diese stationären Vergleichsmuster zu finden, kam das von Halcon bereitgestellte korrelationsbasierte Matching zum Einsatz. Als Ähnlichkeitsmaß zwischen einem Muster und dem Suchbereich dient dabei die normierte Kreuzkorrelationsfunktion. Die Stelle der maximalen Korrelation ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die Position des Referenzmusters im Bild (LUHMANN 2010). Aus den Ergebnissen werden jeweils die Suchbereiche für das nächste Bild generiert. Dieses Vorgehen reduziert die Rechenzeit im Vergleich zu konstanten, größeren Suchbereichen.

Das korrelationsbasierte Matching ist robust gegen Unschärfe und lineare Helligkeitsänderungen. Allerdings ist das Verfahren empfindlich gegenüber Verdeckungen und nichtlinearen Beleuchtungsänderungen, beispielsweise aufgrund wechselnder Bewölkung. Aus diesem Grund werden die Referenzmuster in regelmäßigen Abständen automatisch aktualisiert, sodass die Bilder auch bei wechselnder Bewölkung wie in **Bild 5** stabilisiert werden.



Bild 5: Nichtlineare Beleuchtungsänderungen

7 Hintergrund-Schätzung

Die Basis für eine automatische Erkennung von bewegten Fahrzeugen ist ein Referenzbild, mit dem das zu analysierende Bild verglichen wird. Der Hintergrund der jeweiligen Szene enthält keine beweglichen Objekte und bietet sich daher als Referenz an. Bei der Ermittlung des Hintergrundbildes wurden folgende Probleme festgestellt (DÖGE 2013):

- Tagsüber sind Bilder ohne Fahrzeuge auf durchschnittlich genutzten Straßen nur gelegentlich zu erfassen.
- Das Hintergrundbild verändert sich wegen wechselnder Licht- und Sichtbedingungen. Daraus folgt, dass ein statisches Referenzbild nicht existiert. Der Hintergrund muss demnach geschätzt und automatisch an die wechselnden Umgebungsbedingungen angepasst werden. Eine kontinuierliche Aktualisierung des Hintergrundbildes ermöglicht die Anpassung an Helligkeitsänderungen.

Da der Blickwinkel bei Windböen von den Sollwerten abweicht, verändert sich die perspektivische Verzerrung der betroffenen Einzelbilder. Im Referenzbild kommt es somit zu Unschärfe, die an den Kanten deutlich wird. Vor allem an den Rändern der Straßenmarkierungen tritt dieser Effekt auf, der im Verlauf der Fahrzeug-Erkennung berücksichtigt wird.

Die Hintergrund-Schätzung wurde in der Entwicklungsumgebung Halcon implementiert. Aus den Bildern, die in die Generierung des Referenzbildes einfließen, werden für jeden Farbkanal Mehrkanalbilder erstellt. Die Berechnung der pixelweisen Mittelwerte über die entsprechenden Kanäle mithilfe der in Halcon verfügbaren Prozeduren liefert das Ergebnis der Hintergrund-Schätzung.

8 Fahrzeug-Erkennung

Unter der Annahme, dass nur Fahrzeuge als bewegliche Objekte aufgenommen werden, lässt sich deren Position ermitteln. Dabei wird das zu analysierende Bild B_j vom Referenzbild B_R abgezogen. Für jedes von m zu analysierenden Einzelbildern B_j einer Sequenz ergibt sich mit $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ das Differenzbild

$$D_j = |B_R - B_j|$$

Es hat sich gezeigt, dass der Übergang vom RGB- in den HSV-Farbraum Vorteile bringt, denn anstelle des aus dem RGB-Bild ermittelten Grauwerts liefert die Nutzung des Helligkeit-Kanals V im HSV-Raum insbesondere bei farbigen Fahrzeugen eine robuste Detektion.

Zusammenhängende Regionen im Differenzbild D_j , die eine größere Helligkeit als ein Schwellenwert aufweisen, erzeugen das Binärbild \hat{D}_j und werden weiter betrachtet. Dabei müssen die folgenden allgemeingültigen Merkmale der Einzelregionen berücksichtigt werden:

- Ein Fahrzeug kann aus mehreren Regionen bestehen.
- Mehrere Fahrzeuge können in einer Region verschmelzen.
- Erkannte Regionen können, aber müssen nicht zwangsläufig zu Fahrzeugen gehören.

Weiterhin können von Halcon bereitgestellte morphologische Operatoren angewendet werden, um die Gestalt der Regionen zu verändern. Die Operation „Closing“ schließt Lücken in den Regionen, um ein homogenes Fahrzeugabbild zu erzeugen. Dabei folgt intern eine Erosion auf eine Dilatation. Alle gefundenen Regionen werden auf die Plausibilität geprüft, einem Fahrzeug zu entsprechen. Für die verwendete Auflösung ist eine Mindestgröße von 5×5 Pixeln und eine maximale Länge von 200 Pixeln sinnvoll.

Für einen beispielhaften entzeichneten Luftbildausschnitt B von der Messstrecke bei Hoyerswerda veranschaulicht **Bild 6** die Arbeitsschritte der Bildverarbeitung. Aus der betragsmäßigen Differenz zwischen dem Luftbildausschnitt B und dem Referenzbild B_R resultiert das Differenzbild D . Dessen Helligkeit-Kanal V dient zur Segmentierung mit einem Schwellenwert, sodass sich das Binärbild \hat{D} mit den farblich markierten Fahrzeugregionen ergibt.

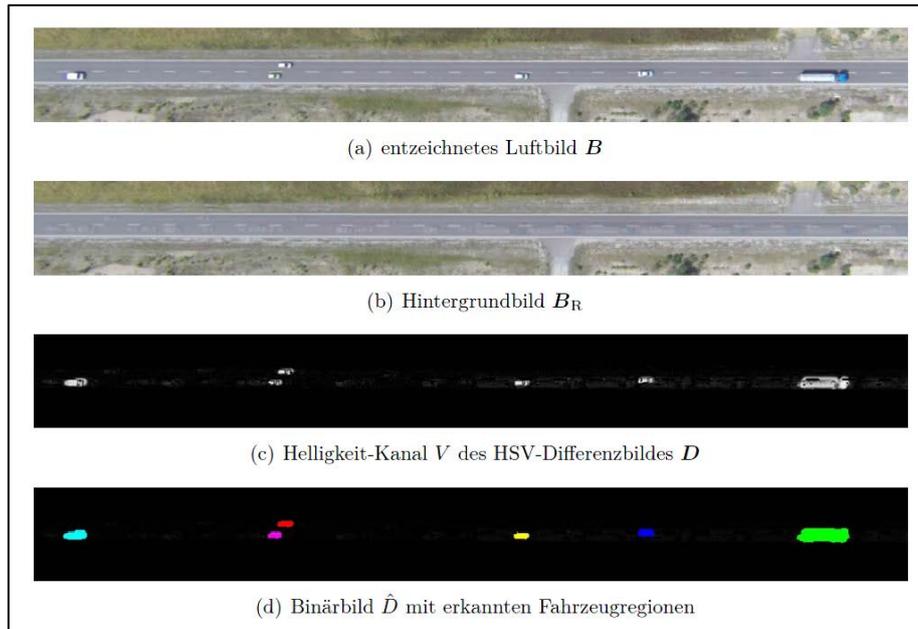
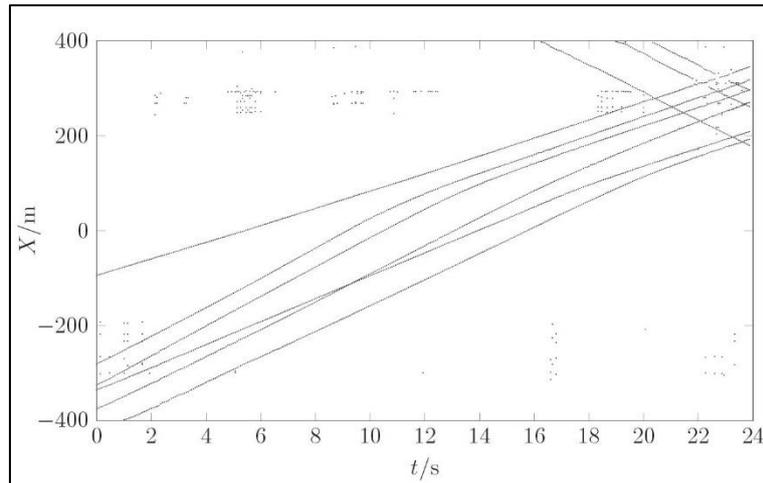
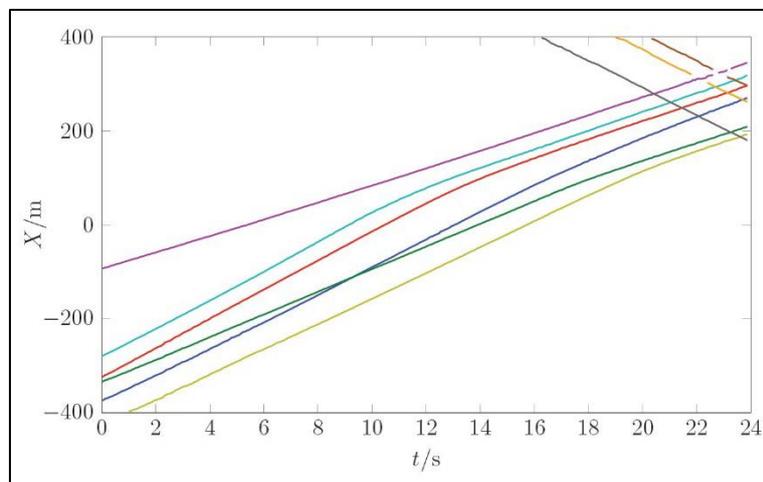
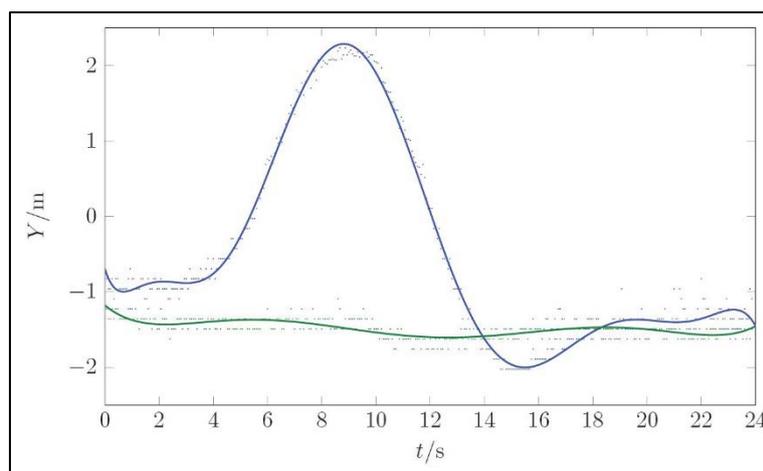


Bild 6: Bilder verschiedener Prozessschritte

9 Filterung und Klassifikation der Fahrzeugpositionen

Die für jedes Bild unabhängig gespeicherten Positionen werden im Rahmen einer Nachbearbeitung den entsprechenden Fahrzeugen zugeordnet. Diese Klassifikation wurde in Matlab implementiert und filtert Koordinaten heraus, die sich keinem Fahrzeug zuordnen lassen. Unter der Annahme, dass ein Fahrzeug in dem Zeitintervall zwischen zwei Einzelbildern eine kurze Strecke zurücklegt, können die wahrscheinlichsten Positionen gefunden werden, die den Weg eines bestimmten Fahrzeuges beschreiben. Die resultierenden Trajektorien kennzeichnen die Bewegung der Fahrzeuge in der Geländeebene. Für die weitere Auswertung der Überholvorgänge ist vor allem die Untersuchung der X-Richtung interessant. **Bild 7a** veranschaulicht einen beispielhaften Zeitverlauf der im Rahmen der Fahrzeug-Erkennung gespeicherten X-Koordinaten. Die diskreten Einträge sind keinem Fahrzeug zugeordnet und enthalten offensichtlich Fehldetektionen. Das Ergebnis nach der Filterung und Klassifikation zeigt **Bild 7b**. Jede Kurve einer Farbe dokumentiert die Bewegung eines Fahrzeuges entlang der abgebildeten Straße und der Anstieg repräsentiert die Geschwindigkeit. Daher entspricht ein Überholvorgang dem Schnittpunkt zweier Kurven, die beide einen wachsenden oder fallenden Anstieg haben. In **b** ist ein Überholvorgang bei $t = 9,5$ s zu sehen. Der Zeitverlauf der Y-Koordinaten und möglicher Ausgleichspolynome für die am Überholvorgang beteiligten Fahrzeuge ist in **Bild c** dargestellt, das Ausscheren während des Überholens ist deutlich erkennbar.

**Bild 7a:** Weltkoordinate X erkannter Fahrzeuge**Bild 7b:** Weltkoordinate X klassifizierter Fahrzeuge**Bild 7c:** Weltkoordinate Y klassifizierter Fahrzeuge

10 Ausblick

Die in diesem Vorhaben vorgestellten Lösungsansätze zur automatischen Auswertung von Überholvorgängen aus Luftbildaufnahmen können auf andere Anwendungsbereiche erweitert werden. Die automatische Analyse der Bewegung von Fahrzeugen ist beispielsweise ebenso in Kurven oder Kreuzungsbereichen möglich, denn das vollständige Abbildungsmodell transformiert die Pixelkoordinaten für den gesamten Bildbereich in Weltkoordinaten. Somit könnten die Geschwindigkeiten und Abstände im Bereich von Unfallschwerpunkten gemessen oder Abbiegevorgänge untersucht werden. Ebenso ist die Beobachtung von gefährlichen Kreuzungsbereichen oder großen Verkehrsknotenpunkten realisierbar. Die Erkennung aller aufgenommenen Fahrzeuge erlaubt des Weiteren die Ermittlung von Kenngrößen der Verkehrsplanung, beispielsweise der Verkehrsstärke. Diese dient der Beurteilung von Qualität, Leistungsfähigkeit und Sicherheit eines Verkehrsablaufs und stellt die Grundlage für eine verkehrstechnische Dimensionierung beim Straßenentwurf dar (HÖFLER 2006). Die Modularisierung der vorgestellten Algorithmen begünstigt ebenso Weiterentwicklungen: So kann der Grad der Automatisierung weiter gesteigert werden, wenn alternative Methoden der Bildstabilisierung ohne die manuelle Auswahl von Vergleichsmustern ähnlich gute Ergebnisse liefern. Beispielsweise ist die Nutzung von mindestens drei signalisierten Passpunkten mit bekannten Koordinaten im Messbereich denkbar. Falls diese nicht auf einer Geraden liegen, kann ein räumlicher Rückwärtsschnitt die externen Kameraparameter für jedes Einzelbild liefern, die eine automatische Korrektur von Rotation und Translation durch affine Transformationen erlauben. Neben der erleichterten Auswertung großer Datenmengen können auf diese Weise die Messunsicherheiten der ermittelten Weltkoordinaten reduziert werden. Allerdings würde sich der Messaufwand erhöhen, sodass die Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer durch auffällige Passpunkte nicht auszuschließen wäre.

Bereits jetzt ist die im Rahmen dieses Projektes entwickelte automatische Auswertung von Luftbildaufnahmen ein nützliches und effizientes Hilfsmittel bei der Analyse von Überholvorgängen und kann somit die weiträumige Verkehrsbeobachtung mithilfe von UAS für zukünftige Anwendungen unterstützen.

Literaturverzeichnis

AIRCLIP - HORUS. <http://airclip.de/copter>, Abruf: 12. Februar 2014

DÖGE K.-P. (2013): Videodetektion im Straßenverkehr. München : Oldenburg

HALCON VERSION 9.0.4 - REFERENZHANDBUCH. Version: 2011.

<http://download.mvtec.com/halcon-9.0-reference-hdevelop-de.pdf>, Abruf: 22. Januar 2014

HÖFLER F. (2006): Verkehrswesen-Praxis - 2: Verkehrstechnik. Bauwerk

HUGHES C., DENNY P., JONES E., GLAVIN M. (2010): Accuracy of fish-eye lens models. In: Applied Optics 49, Jun, Nr. 17, S. 3338 – 3347

LIPPOLD CH., VETTERS A., STEINERT F. (2013): Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen - I. Zwischenbericht. Dresden

LUHMANN T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie / Grundlagen, Methoden und Anwendungen.
3. Aufl. Berlin: Wichmann

SCHNEIDER D., SCHWALBE E., MAAS H.-G. (2009): Validation of geometric models for fisheye lenses. In: Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, Nr. 3, S. 259 – 266

Hochaufgelöste RGBI-Bilddaten mit UAV

Ralf Gehrke, Ansgar Greiwe

*Fachhochschule Frankfurt am Main, Labor für Photogrammetrie und Fernerkundung,
Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, Germany,
Email: ralf.gehrke@fb1.fh-frankfurt.de, ansgar.greiwe@fb1.fh-frankfurt.de*

Zusammenfassung: Hochaufgelöste und kleinräumig erfasste multispektrale Bilddaten können die etablierten Methoden der Fernerkundung in der Landwirtschaft auf vielfältige Weise unterstützen und ergänzen. Der Einsatz eines UAV ermöglicht die flexible Erfassung in einer hohen temporalen Auflösung.

Dieser Beitrag zeigt den Aufbau eines UAV-geeigneten Sensorkopfes für die Erfassung von 4-Kanal Bilddaten. Der Sensorkopf ist aus zwei Kompaktkameras aufgebaut. Die erste Kamera erfasst die Kanäle Rot, Grün, Blau, die zweite Kamera das nahe Infrarot. Die Datenerfassung findet in Flughöhen zwischen 10 m und 100 m statt, welches zu geometrischen Auflösungen (GSD) zwischen 0,4 cm und 4 cm führt. Die Bilddaten werden durch ein selbst entwickeltes Script zu RGBI-Einzelbildern prozessiert und von einer kommerziellen Software zu multispektralen Orthophotomosaiken weiterverarbeitet.

Der Sensorkopf wird zur Erfassung einer ca. 10 ha großen Sukzessionsfläche eingesetzt. Aus 100 m Flughöhe werden Aufnahmen mit einer Bodenauflösung von 3,2 cm erzeugt und zu einem RGBI Orthophotomosaik zur Darstellung in einem GIS weiterverarbeitet.

Deskriptoren: UAV, FOVEON, multispektral

Abstract: *High resolution multispectral images of small areas are able to support the established remote sensing methods in agriculture in many ways. The use of an UAV allows for a flexible data acquisition in a high temporal resolution.*

This paper presents the construction of an UAV appropriate sensor head for the generation of 4-channel image data. The sensor head consists of two compact cameras with one camera modified for the near infrared. The data is collected in flying altitudes of 10 m to 100 m resulting in a ground sampling distance (GSD) of 0,4 cm to 4 cm. The image data is processed through a self-developed script to RGBI images and further processed by commercial software to multi-spectral orthophotomosaics.

The sensor is used to survey an approx. 10 ha large succession area. Single images with GSD of 3,2 cm were captured and processed to a RGBI orthophotomosaic for further data analysis in a GIS.

Keywords: UAV, FOVEON, multispectral

1 Einleitung

UAVs (Unmanned Aerial Vehicle) eignen sich sehr gut für die Erfassung kleinräumiger und sowie räumlich als auch zeitlich hoch aufgelöster Daten. Der überwiegende Teil der in der Praxis eingesetzten UAVs benutzt optische Sensoren im sichtbaren Wellenlängenbereich um z.B. Orthophotomosaik, digitale Oberflächenmodelle und 3D Modelle zu erzeugen (REMONDINO *et al.* 2011). Für die Beurteilung von Vegetationsparameter ist zusätzlich die Erfassung der Strahlung im nahen Infrarot notwendig. Für diesen Zweck gibt es bereits kommerzielle Sensoren wie die Tetracam MCA (KELCEY & LUCIEER 2012) oder die Tetracam ADC (HUANG *et al.* 2010).

Für den Einsatz an einem UAV müssen diese Sensoren einige Rahmenbedingungen erfüllen. UAVs haben im Allgemeinen eine sehr beschränkte Nutzlast. Je leichter die Sensoren sind, umso sicherer und länger kann das UAV fliegen. Die Bewegung und Vibration der Flugplattformen kann nur zum Teil durch eine geeignete Aufhängung kompensiert werden. Daher sind für bewegungsscharfe Bilder kurze Belichtungszeiten notwendig, bei denen gleichzeitig eine hohe Bildqualität erzielt werden soll. Untersuchungen haben gezeigt, dass die genannten kommerziellen Sensoren unter diesen Bedingungen verrauschte Daten (KELCEY & LUCIEER 2012) oder auch durch einen Rolling Shutter Effekt verzerrte Bilder produzieren (GEHRKE & GREIWE 2013).

Die meisten Kameras können durch das Entfernen des Infrarotsperrefilters für die Aufnahme von infraroter Strahlung benutzt werden (VERHOEVEN *et al.* 2009). Durch eine solche Modifikation ist die Aufnahme multispektraler Daten aus einer Kamera mit max. 3 Kanälen (KNOTH *et al.* 2011) oder aus mehreren Kameras (NEBIKER *et al.* 2008) möglich. Die Anwendung solcher Daten wurde bereits demonstriert. So hat BERNIE *et al.* (2009) den Zustand von Olivenbaumplantagen beurteilt oder GINI *et al.* (2012) Klassifizierungen von Baumarten in Parks durchgeführt.

Das Ziel dieses Beitrags ist es, den derzeitigen Stand des an der Fachhochschule Frankfurt am Main entwickelten Sensorkopfes zu zeigen. Der Sensor soll Vierkanalbilddaten (RGBI) in hoher Bildqualität produzieren und gleichzeitig deutlich weniger als 1000 Euro kosten. Der Beitrag schließt mit einem Einsatz des Sensorkopfes auf einer ca. 10 ha großen Sukzessionsfläche und einem Ausblick auf die radiometrische Untersuchung der Sensoreigenschaften.

2 Sensorkonzept

Der an der Fachhochschule Frankfurt entwickelte Sensorkopf besteht aus zwei Kompaktkameras Sigma DP2. Die in Sigma Kameras verbauten Foveon Sensoren haben sich durch ihre besondere Bauart für hochqualitative Bilder bei UAV-typischen kurzen Belichtungszeiten ausgezeichnet (GREIWE & GEHRKE 2013). Eine Kamera ist durch das Entfernen des Infrarotsperrefilters und das Anbringen eines 720 nm Infrarotfilters modifiziert

(Bild 1). Das Gesamtgewicht von ca. 600 g ist im Nutzlastlimit des Fluggerätes, die Kosten für zwei gebrauchte Kameras und einen Filter betragen ca. 600 Euro.



Bild 1: UAV MR-X8 mit Sigma DP2 Sensorkopf

Beide Kameras werden simultan ausgelöst. Durch ein kleines Offset der Auslösezeitpunkte kommt es zu einer für jedes Bildpaar unterschiedlichen relativen Orientierung der Kameras, so dass die Coregistrierung der Bilddaten für jedes Bildpaar einzeln durchgeführt werden muss (GEHRKE & GREIWE 2013). Für diesen Prozess wurde batch-fähiges ein Python Script zur projektiven Entzerrung des IR Bildes auf das RGB Bild durch automatisch gefundene identische Punkte mittels eines Interest-Operators und anschließender Ausgleichung mit Grobfehleranalyse nach dem Gauss-Markov-Modell entwickelt. Bei diesem Prozess wird ebenfalls eine radiometrische Korrektur der einzelnen Kanäle durch ein im Flug aufgenommenes Stück Spektralton durchgeführt.

3 Erfassung einer Sukzessionsfläche

In Zusammenarbeit mit dem Umweltamt der Stadt Frankfurt am Main wurde eine etwa 10 ha große Sukzessionsfläche an dem Fluss Nidda befliegen. Die Befliegung wurde in 6 Streifen zu je ca. 13 Bildern in 100 m Flughöhe durchgeführt (**Bild 2**). Das führt zu einer Bodenauflösung (GSD) von 3,2 cm. Für die absolute Orientierung des Bildverbandes wurden 8 signalisierte Passpunkte mit SAPOS-GPS gemessen.

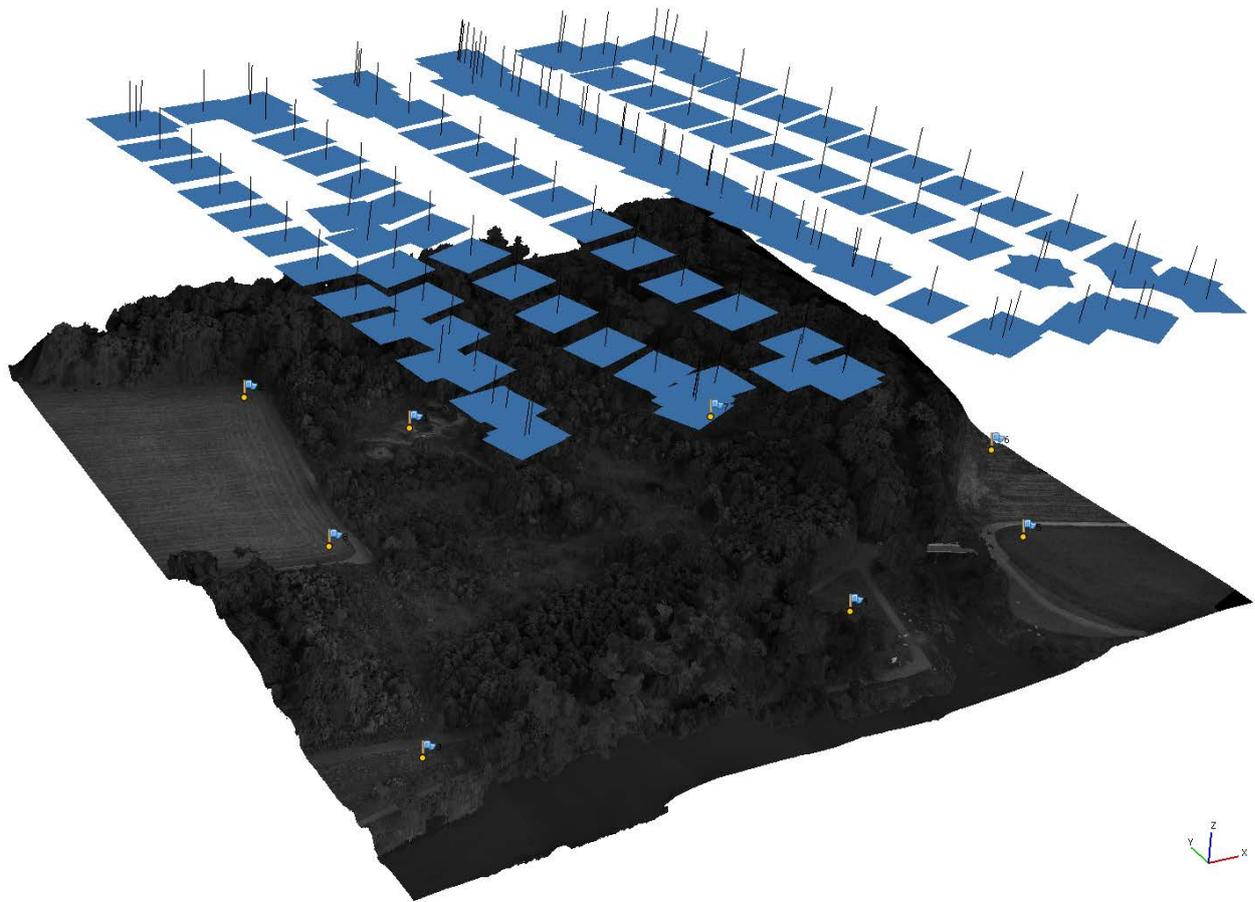


Bild 2: Bildflug

Die Auswertung der Bilddaten unterteilt sich in die Bildverarbeitung zu RGBI Einzelbildern und die photogrammetrische Auswertung in Agisoft PhotScan Pro. Bei der Bildverarbeitung werden die Bildpaare der Kameras Coregistriert und die 4 Kanäle anhand einer aufgenommenen Spektralontafel relativ zueinander kalibriert. Die gesamte Auswertung nahm ca. einen Tag in Anspruch.

Als Ergebnis wird dem Anwender ein georeferenziertes RGBI Mosaik bereitgestellt, welches in einem GIS für weitere Analysen aufbereitet werden kann (**Bild 3**).

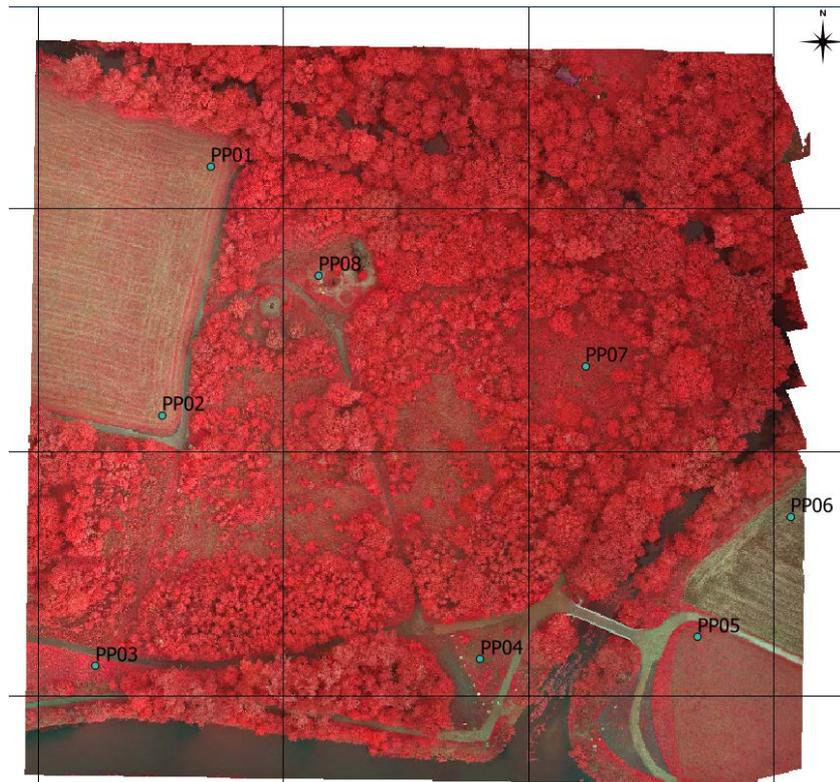


Bild 3: RGBI Orthophotomosaik als CIR Darstellung

4 Ausblick

Der Sensorkopf wird derzeit in der Luftbildarchäologie zur Anwendung gebracht. Die Erfassung des nahen Infrarots ist für die Erkennung von Vegetationsstörungen durch archäologische Überreste im Boden gut geeignet. Ein besonderes Augenmerk soll dabei auf die radiometrische Datenqualität gelegt werden. Während die Bildqualität hinsichtlich der Kontrastübertragung bereits untersucht wurde (GREIWE & GEHRKE 2013), wird dabei auf die spektrale Separation und die lineare Sensorcharakteristik eingegangen.

Literaturverzeichnis

- BERNI J.A.J., ZARCO-TEJADA P.J., SUAREZ L., GONZALES-DUGO V., FERERES E. (2009):** Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispectral and Thermal Imaging Sensors. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38, Hanover, Germany
- GEHRKE R., GREIWE A. (2013):** Multispectral Image Capturing with FOVEON Sensors. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 40, UAV-g 2013, Rostock, Germany, 151 – 156
- GILBLUM D.L., KEUN YOO S., VENTURA P. (2003):** Operation and Performance of a Color Image Sensor with Layered Photodiodes. In: The Proceedings of the SPIE, 5074, Infrared Technology and Applications XXIX

- GINI R., PASSONI D., PINTO L., SONA G. (2012):** Aerial Images from an UAV System: 3D Modeling and Tree Species Classification in a Park Area. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 39, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 361 – 366
- GREIWE A., GEHRKE R. (2013):** Foveon Chip oder Bayer Pattern - geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie mit AUS. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, edited by T Luhmann & C Müller (Wichmann Verlag), 334 – 343
- HUANG Y., THOMSON S.J., LAN Y., MAAS S.J. (2010):** Multispectral Imaging Systems for Airborne Remote Sensing to Support Agricultural Production Management. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 3(1):
- KELCEY S., LUCIEER A. (2012):** Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing, Remote Sensing 2012, 4: 1462-1493
- KNOTH C., PRINZ T., LOEF P. (2011):** Microcopter-Based Infrared (CIR) Close Range Remote Sensing as a Subsidiary Tool for Precision Farming. In: Proceedings of the ISPRS Workshop on Methods for Change Detection and Process Modeling, University of Cologne
- NEBIKER S., ANNEN A., SCHERRER M., OESCH D. (2008):** A Light-weight Multispectral Sensor for Micro UAV - Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 37(1), 1193 – 1199
- REMONDINO F., BARAZZETTI F., NEX F., SCAIONI M., SARAZZI D. (2011):** UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives, In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38, UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland
- VERHOEVEN G.J., SMET P.F., POELMAN D., VERMEULEN F. (2009):** Spectral Characterization of a Digital Still Camera's NIR Modification to Enhance Archaeological Observation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(10): 3456 – 3468

Vision-based estimation of cloudiness from weather maps for agricultural modelling

Erick Ronoh¹, Thomas Rath²

¹ *Leibniz Universität Hannover, Institute of Horticultural Production Systems, Biosystems Engineering, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover*

² *University of Applied Sciences Osnabrück, Biosystems Engineering Laboratory, Oldenburger Landstr. 24, 49090 Osnabrück*

Email: ronoh@bgt.uni-hannover.de, t.rath@hs-osnabrueck.de

Various attempts have been made to quantify cloud cover in numerical weather prediction models. Cloudiness influences the weather on earth in general and especially longwave radiation emitted by the atmosphere downward to the earth's surface. Precise estimation of cloudiness is therefore important for numerous applications in agriculture and horticulture requiring rain fall, surface radiation and energy balance.

Hence, the objective of this study was to estimate the cloudiness factor during both day and night through a vision-based analysis of ground-based weather maps. The weather maps were acquired from the webservice Weather Online at intervals of 5 minutes. These maps provide sufficient weather elements over a geographical area at a specified time. A computer vision based algorithm was developed with Halcon 11.0 which identifies selected regions of interest on the maps and calculates the cloudiness situation at a given location. For purposes of comparison, cloud cover in octas (eighths) was also obtained from the German Meteorological Service. The hourly octa values rely on visual inspection of the sky by an experienced weather watcher.

The results show that both approaches have similar trends. But overall a small statistically significant difference ($p < 0.001$) between the two cloudiness prediction approaches (online weather maps and sky watcher) were found. Further comparison indicates that the mean error of cloudiness prediction was higher during the day than at night. This could be attributed to influences by light and solar radiation.

The resulting data were used to simulate longwave radiation exchange of an experimental greenhouse. The results were compared with thermal radiation exchange measurements. The usage of the cloudiness factors shows no significant difference ($p > 0.05$) in terms of radiation simulation. That means that for this kind of energy application the weather map simulation data are accurate and precise enough.

Overall the map based cloudiness factors, generated by the computer vision approach, could be used in different agricultural and horticultural modelling applications. With this we can solve the problem of missing cloudiness data at any time and any location.

Keywords: Cloudiness, weather maps, vision-based analysis, longwave radiation

Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzenhöhen, Ähren und Grannen

Ivana Kovacheva¹, Simon Kerssen², Daniel Mentrup², Tina Rosemann², Kevin Bilges², Arno Ruckelshausen¹

¹ University of Applied Sciences Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, Germany

² iotec GmbH, Albert-Einstein-Str. 1, 49076 Osnabrück, Germany

Email: a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Bildgebenden Lichtschrankensensoren – wie Lichtgitter und Laserzeile - werden zur Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmale entwickelt und in Systeme zur Auswertung der Daten integriert. Die Sensorsysteme werden Indoor (Gewächshaus) sowie Outdoor (Feldroboter) eingesetzt und nehmen binäre Daten der Pflanzenbestände auf. Diese Daten stellen ein Schattenbild der vermessenen Pflanzen dar, die für den neu entwickelten Lasersensor sogar die Detektion der Grannen ermöglicht. Durch Bildverarbeitungsalgorithmen können Pflanzenparameter aus den Rohdaten extrahiert werden, Beispiele für Triticale sind die Pflanzenhöhe, die Ährenlänge oder der Winkel zwischen Ähre und Halm.

Deskriptoren: Bildgebende Lichtschrankensensoren, Lichtgitter, Laserzeilensensor, morphologische Pflanzenparameter, Phänotypisierung

Abstract: *Imaging light barrier sensors – such as light curtains and laser line sensor – are developed and applied in systems for the detection of morphological plant properties. The sensors are used indoor (greenhouse) and outdoor (field robots) and take binary data of the crop profile, which can be used for even detecting the awns with the new developed laser sensor. With image processing algorithms crop properties can be extracted from the raw data, examples for Triticale are crop height, ear length or the angle between stalk and ear.*

Keywords: *Imaging light barrier sensors, light curtain, laser line sensor, morphological plant parameters, phenotyping*

1 Einleitung

Sensorsysteme zur dynamischen Erfassung von Pflanzen-, Boden-, Maschinen- und Umgebungsmerkmalen spielen in Kombination mit weiteren Daten eine zentrale Rolle zur gleichzeitigen Optimierung ökonomischer und ökologischer Fragestellungen im Pflanzen- und Gartenbau sowie in der Forstwirtschaft. Der Einsatz innovativer – insbesondere bildgebender – Sensorsysteme spielt gerade für die Pflanzenzüchtung eine wesentliche Rolle, da dort Defizite in der Verfügbarkeit robuster Sensor und einer Systemtechnik zur Datenaufnahme auftreten. Zur Kompensation variierender Selektivitäten

der Pflanzen und Umgebungsmerkmale bietet die Sensorfusion das Potenzial zur robusten Merkmalbestimmung unter Feldbedingungen. Die Komplexität der Messbedingungen und die zeitliche und räumliche Zuordnung der einzelnen Sensoren sind dabei maßgebliche Herausforderungen für die Phänotypisierungsplattformen (BUSEMEYER *et al.* 2013). Das Potenzial dabei ist erheblich, bis hin zu Möglichkeiten der Individualpflanzen-Phänotypisierung bei Mais (FENDER *et al.* 2006, RUCKELSHAUSEN 2014).

Die Mehrzahl bildgebender Systeme (z.B. Farbkameras, Spectral Imaging, Lichtschnitt-Kameras) blicken von oben auf den Feldbestand und sind daher bzgl. der vollständigen Informationen zu den Pflanzen – und insbesondere auch bei deren Überlappung – eingeschränkt. Durch die seitliche Abtastung mit Lichtschranken bieten sich Lösungsoptionen für diese Fragestellungen. Die Autoren entwickeln seit ca. 1997 bildgebende Lichtschrankensysteme und integrieren kommerzielle Systeme in die Feldversuchstechnik oder Landwirtschaft (siehe z.B. DZINAJ *et al.* 1998, RUCKELSHAUSEN *et al.* 1999, FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2013).

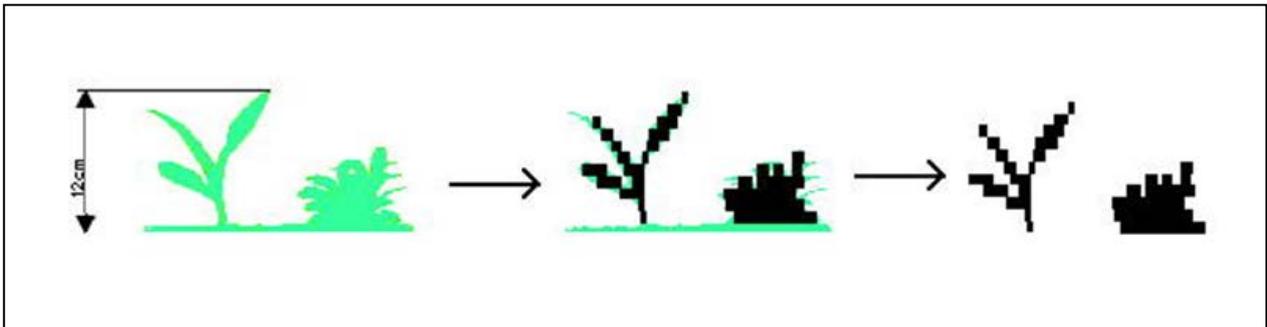


Bild 1: Messtechnische Realisierung des Prinzips bildgebender Lichtschrankensensoren („Schattenbild“) im Feldversuch am Beispiel einer Mais- und Beikrautpflanze (KIELHORN *et al.* 2000)

Das Messprinzip ist in **Bild 1** dargestellt: Das Schattenbild der Pflanzen wird durch bildgebende Lichtschranken mit einer entsprechenden Auflösung abgetastet und die resultierenden Binärdaten eines „Endlosbildes“ werden mit Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet. In dem Beispiel von **Bild 1** wurde das System für die Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern bei der mechanischen Beikrautregulierung innerhalb von Maisreihen eingesetzt (KIELHORN *et al.* 2000).

Das System kann beispielsweise sehr gut für die Bestimmung des Höhenprofils von Pflanzen eingesetzt werden, in Feldversuchen werden für Mais und Triticale seit mehreren Jahren Feldversuche durchgeführt. **Bild 2** zeigt dazu die schematische Anordnung für Mais mit den eingezeichneten Lichtschranken und das entsprechende Messprofil des Feldversuchs (FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2011). Durch die Integration eines Wegsensors (z.B. ein Drehgeber) wird die Proportionalität der Messsignale in Bewegungsrichtung erfasst, so dass räumlich unverzerrte Binärdaten in die Algorithmen zur Analyse der Endlosbilder einfließen. Die Sensoren werden auch in größeren Pflanzenbeständen eingesetzt, **Bild 2** zeigt auch Lichtgitter im Triticale-Bestand, hier werden Pflanzenhöhen bis ca. 2 m vermessen. Aus sicherheitstechnischen Gründen (Beschädigungen) bei der Überfahrt sind die Gitter etwas schräg angeordnet, die resultierenden Messdaten werden entsprechend korrigiert.

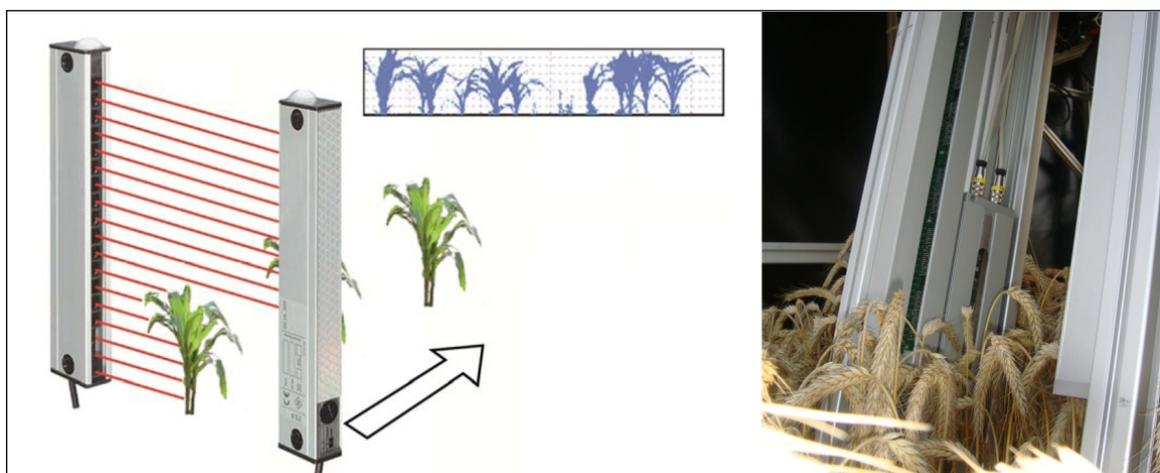


Bild 2: Sensoraufbau zur Feldmessung bildgebender Lichtschranken (am Beispiel Lichtgitter) in Mais und Triticale (BUSEMEYER *et al.* 2010)

Die Messung des seitlichen Pflanzenprofils bietet sowohl im Labor/Gewächshaus als auch auf dem Feld nützliche Informationen. Auf Grundlage der beschriebenen Arbeiten haben mittlerweile auch andere Arbeitsgruppen diese Technologien zur Indoor-Pflanzenphänotypisierung (FANOURKIS *et al.* 2014) oder in Feldversuchen bei Mais (MONTES *et al.* 2011) eingesetzt, in beiden Fällen wurden Lichtgitter als bildgebende Lichtschrankensensoren eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Weiterentwicklung der Feldversuchs-Technologien unter folgenden Zielrichtungen beschrieben:

- a) Die Ermittlung weiterer Pflanzenparameter aus den Rohdaten (z.B. Eigenschaften der Ähren bei Triticalen)
- b) Die weitere technologische Verbesserung der räumlichen Auflösung der bildgebenden Lichtschrankensensoren durch den Einsatz von Laserzeilensensoren an Stelle von Lichtgittern.

2 Material und Methoden

Als bildgebende Lichtschrankensensoren werden 2 unterschiedliche Prinzipien eingesetzt:

- (1) Lichtgitter: Eine Vielzahl individueller Lichtschranken mit jeweils einem Sender (typischerweise eine LED) und einem Empfänger (typischerweise eine Fotodiode), die übereinander angeordnet sind und seriell ausgelesen werden. Diese Lichtgitter werden bisher typischerweise bei Feldmessungen eingesetzt (DZINAJ *et al.* 1998, FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2010/2013, MONTES *et al.* 2011).
- (2) Lasersensor: Es wird eine einzige Lichtquelle (typischerweise ein Laser) verwendet, das Licht wird optisch auf eine Zeile projiziert und eine CCD/CMOS-Sensorzeile dient als Detektor. Diese Lichtschrankentechnologie wurde bisher nicht zur Pflanzenphänotypisierung eingesetzt.

Lichtgitter

Das Lichtgitter InfraScan 5288/2.5 der Firma Sitronic GmbH (siehe **Tabelle 1**) wird für Feldmessungen in Mais und Triticale eingesetzt (BUSEMEYER *et al.* 2010). Das System besteht aus diskreten Sendern (übereinander angeordneten Infrarot Sendedioden) und Empfängern (übereinander angeordneten Silizium-PIN-Fotodioden), wobei die Empfänger den auf sie fallenden Lichtstrahl detektieren. Wenn sich ein Objekt zwischen den Sensoreinheiten befindet, dann sind die Lichtstrahlen an diesen Stellen unterbrochen. Die Auflösung von 2,5 mm in vertikaler Richtung (y-Richtung) wird durch den Abstand zwischen den einzelnen Lichtschranken bestimmt. Bewegen sich entweder der Sensor (z.B. auf einer Phänotypisierungsplattform) oder die Pflanzen (z.B. auf einem dynamischen Labormessstand), so entsteht aus den einzelnen „Bildern“ (frames) des Lichtgitters ein kontinuierliches binäres Bild. Ein Drehgeber (auf der Plattform oder dem Teststand) gibt die Position des Messobjektes mit ca. 1 mm Genauigkeit an und wird in die Systemtechnik integriert. Somit ist die Skalierung in Bewegungsrichtung unabhängig von der Relativgeschwindigkeit von Pflanzen und Sensor, auch werden morphologische Daten zusätzlich in Bewegungsrichtung absolut messbar. Die aufgenommenen Daten des Lichtgitters werden mit Zeit- und Ortsstempel in eine MySQL Datenbanken abgespeichert. Aus diesen Informationen können durch automatische und halb-automatische Bildverarbeitungs- Algorithmen die Pflanzenhöhe(**h**), Ährenlänge(**l**), Winkelstellung der Ähren gegenüber dem Halm(**w**) sowie die Anzahl von den erfassten Pflanzen bestimmt werden (siehe auch **Bild 5**).

Tabelle 1: Vergleich charakteristischer Daten für ein Lichtgitter (InfraScan, Sitronic) und einen Laserzeilensensor (iotec GmbH).

Parameter	Lichtgitter InfraScan 5288/2.5	Laserzeilensensor
Hersteller	SITRONIC GmbH	iotec GmbH
Optische Daten		
Dioden/Pixelanzahl	288 Dioden	1536 Pixel (pro 98 mm Messfeld)
Strahlenabstand/Auflösung	2.5 mm	64 µm
Messfeld	720 mm	98 mm (kaskadierbar)
Abstand Sender-Empfänger	0,2 m bis 6,5 m	0,1 m bis 10,0* m
Wellenlänge	950 nm	650 nm
Optisches Filter	Tageslichtsperrfilter	Rotlichtfilter, Tageslichtsperrfilter
Elektrische Daten		
Ausgabemodi	Binär, BCD oder Gray	Binär oder Grauwerte (8 Bit)
Zykluszeit	3,08 ms	250 µs
Schnittstellen	RS422, Konverteer RS422→RS232	Ethernet
Weitere technische Daten		
Schutzklasse		Laserklasse 1
Schutzart	IP 67	IP 66*
Betriebstemperaturbereich	-25°C...50°C	-0°C...55°C

Laserzeilensensor

Bildgebende Lichtschranken können auch mit einer einzelnen Linienlichtquelle (z.B. ein Laser) und einem integrierten CCD/CMOS-Zeilensensor aufgebaut werden. Die örtliche Auflösung liegt damit im Bereich des einzelnen Bildsensorpixels (z.B. bei 64 µm) und ist deutlich höher im Vergleich zu den oben beschriebenen Lichtgittern mit diskret aufgebauten Sensor-Empfänger-Kombinationen (2500 µm). Für landwirtschaftliche Anwendungen wurde ein ähnliches System zur Messung von Saat- oder Düngerkörnern aufgebaut (FENDER *et al.* 2007). Die Firma iotec GmbH hat nun ein solches System mit einem hochauflösenden Lasersensor für den Einsatz in der Pflanzenphänotypisierung aufgebaut (**Tabelle 1**). Es wird – wie bei einem Lichtgitter – ein Schattenbild erzeugt. Die deutlich verbesserte Auflösung führt dazu, dass nun neben den Ähren auch die Grannen bei Triticalen erfasst werden können und damit weitere Pflanzenparameter bei der Feldphänotypisierung zugänglich werden. Das entwickelte Laserzeilensensorsystem besteht aus Laserdioden auf der Senderseite und CCD/CMOS-Bildsensoren auf der Empfängerseite. Das sichtbare Rotlicht der Laserdiode wird über die interne Optik in eine Linie aufgeweitet. Die Objekte werden nach dem Schattenwurfprinzip vermessen

mit einer ca. 40-mal höheren Pixelauflösung als das vorgestellte Lichtgitter. Die Datenumwandlung erfolgt durch einen FPGA - Field Programmable Gate Array (ROSEMANN 2013). Infolge liegt die Bildauflösung in horizontaler x-Richtung wie in vertikaler y-Richtung im μm -Bereich (auch bei ca. 1 km/h Geschwindigkeit). Somit können die Granen an den Ähren vermessen werden und damit die Option zur Bestimmung der Körnerzahl pro Ähre durch einen entsprechenden Bildverarbeitungsalgorithmus.

Experimentelle Umgebung

Mit den Systemen werden sowohl Labormessungen an dynamischen Messständen im Labor (**Bild 3**) als auch Feldmessungen mit den Phänotypisierungsplattformen BoniRob und BreedVision (**Bild 4**) durchgeführt.



Bild 3: Dynamischer Messplatz (Förderband) zur Sensor- und Algorithmenentwicklung unter Laborbedingungen; Laserzeilensensor-Modul im Ährenbereich (links) und Lichtgitter über die gesamte Pflanzenhöhe (rechts)



Bild 4: Feldmessungen mit bildgebenden Lichtgittern in Mais mit dem autonomen Feldroboter BoniRob (links) und der Phänotypisierungsplattform BreedVision in Triticale (rechts) nach BUSEMEYER *et al.* 2010 sowie dort aufgeführter Referenzen.

Für die Messungen im Labor werden Versuchsplots durch echte Pflanzen modelliert. Dabei wurden die einzelnen Pflanzen auf einer MDF-Platte (1 m Länge und 0,25 m Breite) an zufälligen Koordinaten in senkrechter Position platziert. Die Pflanzenplots werden mithilfe eines Förderbandes mit definierter variabler Geschwindigkeit (typisch 0,5 m/s) durch die Sensoreinheiten bewegt. Unter anderem wurden Modelle mit Bestandesdichten von 450 Ähren pro m² und 600 Ähren pro m² vermessen, die realen Triticale-Feldbeständen entsprechen. Die Rohdaten werden im Anschluss mit den entwickelten Algorithmen analysiert.

Algorithmen

Für die Bestimmung der morphologischen Pflanzenparameter bei Triticale wurden zwei Methoden entwickelt - halbautomatisch und automatisch (KOVACHEVA 2013). Das erste Verfahren gibt dem Benutzer die Möglichkeit die gewünschten Ähren auf dem aufgenommenen Schattenbild mithilfe der Maus zu selektieren und speichert die Koordinaten von Ährenspitze(x_1, y_1) und Ährenanfang(x_2, y_2) ab. Aus diesen Informationen werden die Pflanzenparameter ermittelt, dieses Verfahren ist auf Lichtgitter- sowie auf Lasersensordaten übertragbar. Die zweite Methode bestimmt die Parameter aus der Binärinformation durch eine Reihe morphologische Bildverarbeitungsoperationen. Dabei werden vorrangig morphologische Öffnung, Dilatation und Skelettierung des Bildes angewendet. Somit werden die Halme aus dem Bild entfernt und aus dem Skelett des Ährenbereiches werden weiterhin die einzelnen Ähren automatisch detektiert. Ziel von beiden Verfahren ist die Bestimmung der Ährenkoordinaten. Wenn sie bekannt sind, können weiterhin die gesuchte Parameter **h**, **l** und **w** ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass die Halme senkrecht zum Boden stehen. Die automatische Methode kann (bisher noch nicht) zwischen Ährenanfang und Ährenspitze nicht unterscheiden und aus diesem Grund wird angenommen, dass **w** kleiner als 90° ist (siehe **Bild 5**). Der Winkel **w** wird mithilfe Formel (1) berechnet.

$$w = \frac{180}{\pi} * \operatorname{atan}\left(\frac{|x_1 - x_2| * \text{Auflösung}_x}{|y_1 - y_2| * \text{Auflösung}_y}\right) \quad (1)$$

Für jede selektierte oder automatisch erkannte Ähre werden die gesuchten Parameter einzeln berechnet. Als letzter Schritt werden mittlere Pflanzenhöhe, mittlere Ährenlänge, mittlerer Winkel sowie mittlerer Ähren-Halm-Faktor (Quotient von Ährenlänge und Pflanzenhöhe) berechnet. Diese Mittelwerte werden mithilfe der detektierten Ähren ermittelt, die größer als 70 mm sind; dadurch wird der Einfluss von falsch erkannten (selektierten) Ähren auf das Gesamtergebnis minimiert.

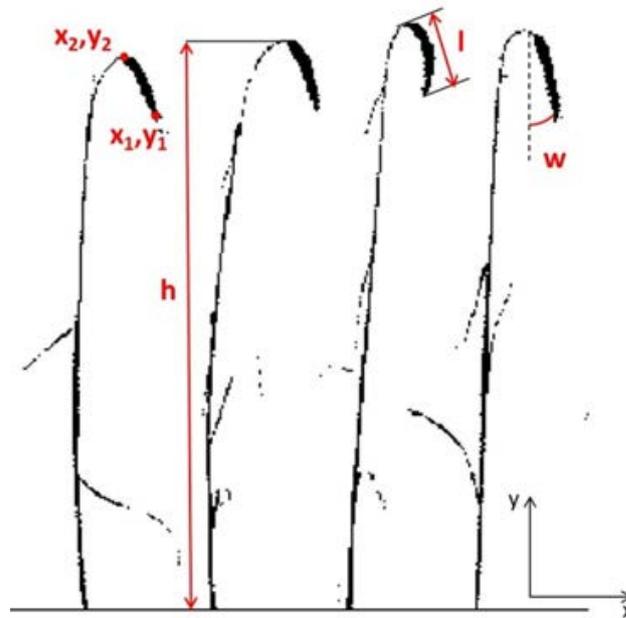


Bild 5: Definition der Ährenkoordinaten (Spitze: x_1, y_1 ; Anfang: x_2, y_2), der Ährenlänge l , des Ährenwinkels w und der Pflanzhöhe h für Triticale am Beispiel einer Messung an einem Förderband-Testplatz (siehe **Bild 4**).

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der dynamischen Feldmessungen mit dem Lichtgitter – insbesondere zur Biomasse-Bestimmung - werden ausführlich in BUSEMEYER *et al.* 2013 und dort aufgeführten Referenzen beschrieben. In diesem Beitrag werden die Bestimmung der Pflanzenparameter aus den Rohdaten bildgebender Lichtschrankensysteme sowie die ersten Messresultate des Laserzeilensensors beschrieben. **Bild 6** zeigt Messdaten am dynamischen Labormessstand für das Lichtgitter (sitronic) und den Laserzeilensensor (iotec). Zusätzlich wurde ein Lichtgitter mit niedrigerer Auflösung (5 mm; KONTURflex, Leuze) zum Vergleich mit aufgenommen, welches die Ähren nicht auflösen kann. Die Ähren sind bei dem InfraScan-System deutlich erkennbar, der Laserzeilensensor ist sogar in der Lage, die Grannen zu detektieren. Die Entwicklung eines Algorithmus, der die Grannen an den Ähren aus dem Binärbild erkennt, ermöglicht die Schätzung der Körner pro Ähre.

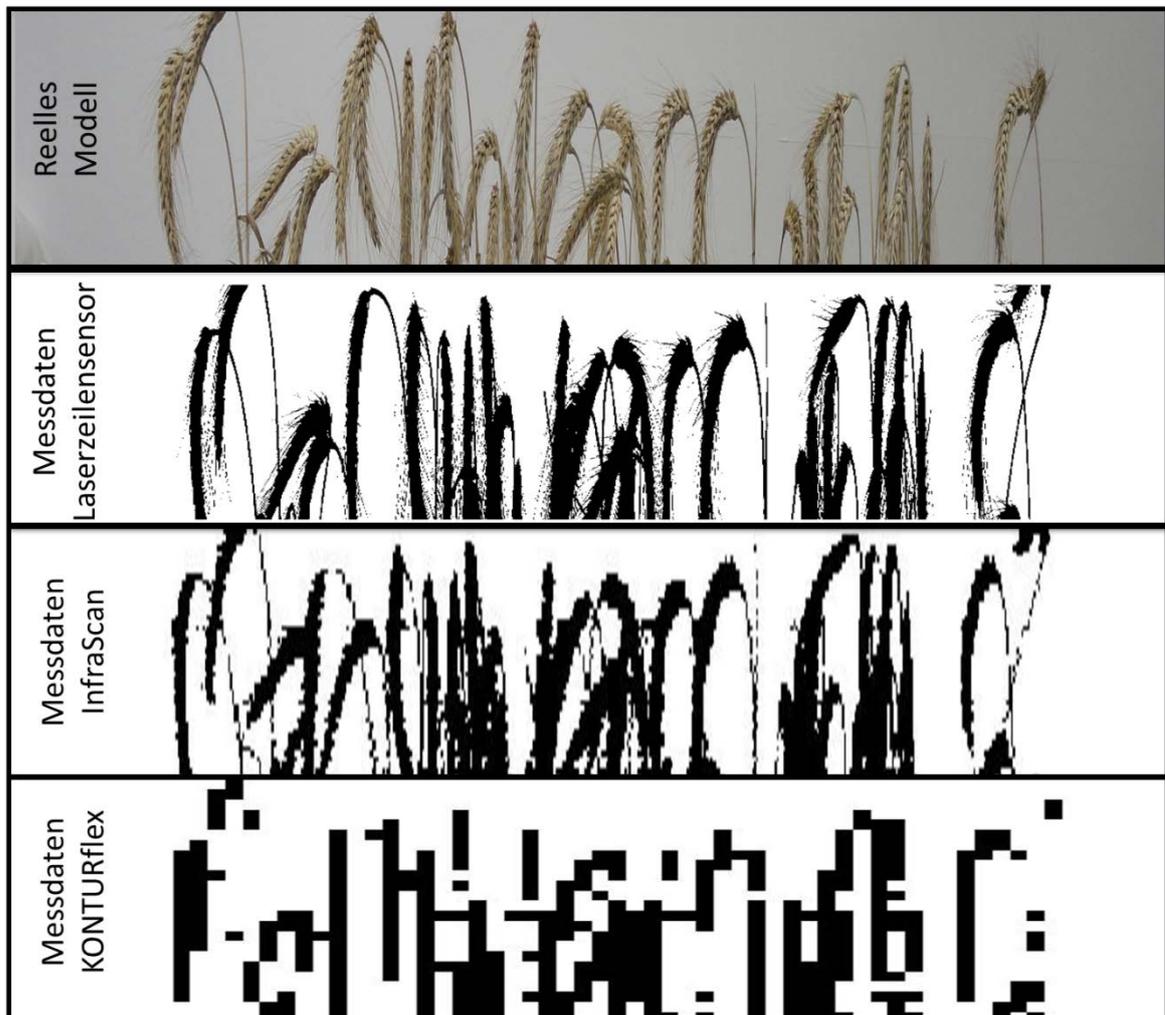


Bild 6: Vergleich verschiedener bildgebender Lichtschrankensensoren für Triticale unter dynamischen Laborbedingungen am Förderband (von oben nach unten): Photo (Modellpflanzen), Laserzeilensensor mit Grannendetektion, Lichtgitter mit Auflösung der Ähren (InfraScan) sowie zum Vergleich ein Lichtgitter mit niedrigerer Auflösung (Konturflex).

Das Ergebnis des vollautomatischen Algorithmus zur Ährenerkennung ist in **Bild 7** dargestellt. Dabei wurde ein Pflanzenplot mit 148 Pflanzen (Bestandesdichte ca. 600 Ähren pro m^2) vermessen. Der Algorithmus hat die mittlere Höhe von dem Bestand berechnet und 140 Ähren (rot markiert) detektiert, davon wurden 57 vollständig (>70 mm) detektiert. Daraus folgt, dass die Mittelwerte von den gesuchten Parametern aus ca. 40% aller Pflanzen berechnet wurden.

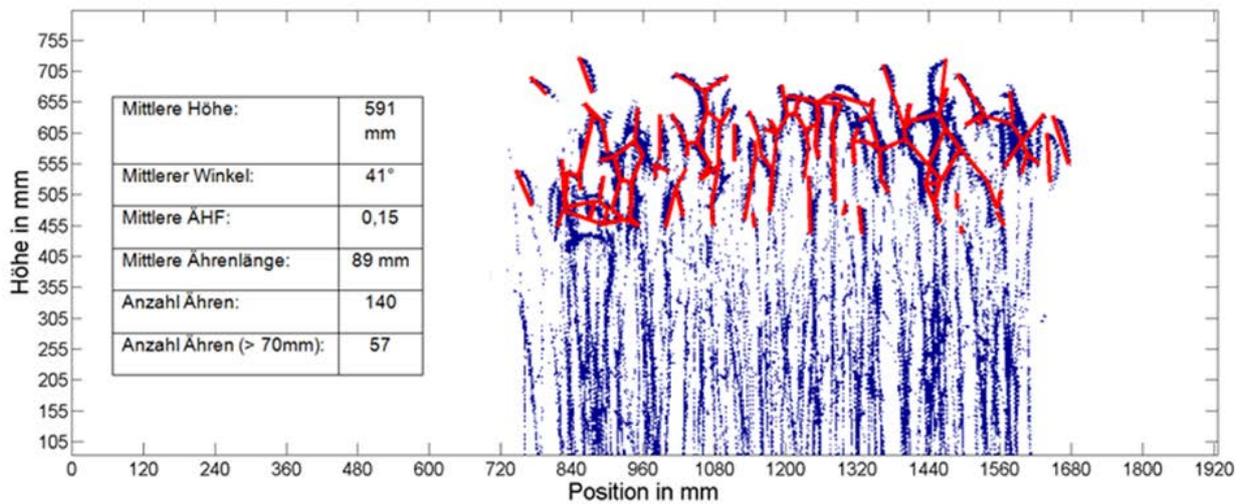


Bild 7: Automatische Ermittlung von Pflanzenparametern aus bildgebenden Lichtschrankensensoren am Beispiel Triticale (KOVACHEVA 2013)

Aus der Häufigkeitsverteilung des Ährenwinkels w (**Bild 8**) kann die Streuung der Winkel zwischen den Ähren gegenüber den Halmen abgeschätzt werden. Die Daten können z.B. hinsichtlich des Reifegrades interpretiert werden.

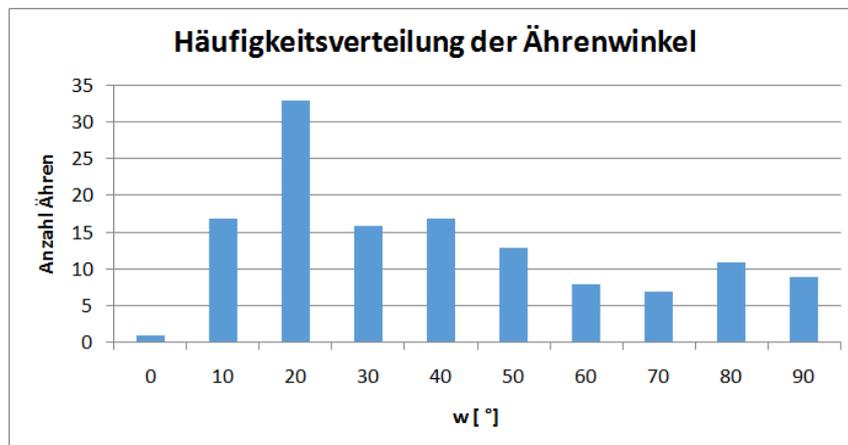


Bild 8: Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung des Ährenwinkels w (Ähre zu Halm)

4 Ausblick

Bildgebende Lichtschrankensensoren - Lichtgitter und ein Lasersensor - werden für die Erfassung morphologischer Merkmale von Triticale eingesetzt. Das kontinuierliche Auslesen von unterbrochenen und ununterbrochenen Strahlen ergibt bei bewegten Pflanzen oder bewegtem Sensor ein Seitenprofil der Bestände in Form eines Binärbildes. Dieses Bild kann durch halbautomatische und automatische Algorithmen analysiert werden, um die Pflanzenparameter Höhe, Ährenlänge, Winkel der Ähren gegenüber den Halmen, Ähren-Halm-Faktor sowie die Anzahl der vermessenen Pflanzen zu ermit-

teln. Aus diesen Daten können weitere agronomische Werte der Bonitur berechnet werden: die effektive Höhe der Pflanze und die Bestandesdichte.

Die sehr gute Auflösung (unterhalb von 0,1 mm) des Laserzeilensensors ermöglicht die Vermessung der Grannen an den Ähren. Dieser bis jetzt nicht technisch erfasster Parameter kann für andere agronomische Merkmale wie Anzahl Körner pro Ähre, Tausendkornmasse und Kornertrag pro m² von großer Bedeutung sein. Hierzu werden Messungen im Labor und Feld durchgeführt. Die entwickelte Laserzeilensensor-Technologie öffnet damit neue Einsatzfelder für die bildgebenden Lichtschrankensensoren. Die Kaskadierung des Sensors ermöglicht darüber hinaus ein größeres Messfeld und somit die Erfassung von ganzen Pflanzen, dies ist in **Bild 9** dargestellt.

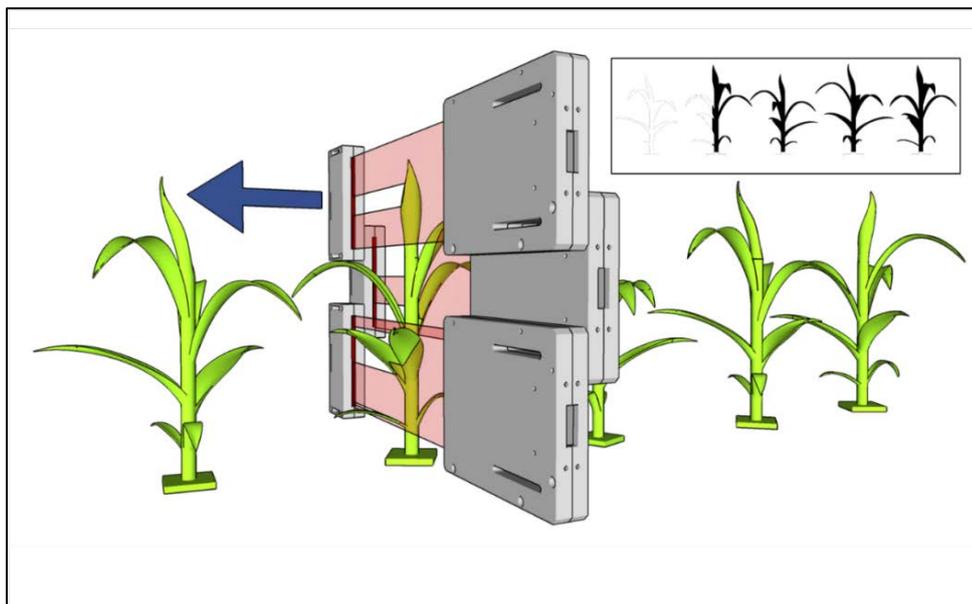


Bild 9: Schematische Darstellung zur Kaskadierung von Laserzeilensensoren zur Vermessung kompletter Pflanzen; der Sensor bewegt sich von rechts nach links

Literaturverzeichnis

- BUSEMEYER L., KLOSE R., LINZ A., THIEL M., WUNDER E., TILENAC M., RUCKELSHAUSEN A. (2010):** Agro-sensor systems for outdoor plant phenotyping platforms in low and high density crop field plots; Proceedings 68th International Conference Agricultural Engineering 2010, pp.213 - 218
- BUSEMEYE L., MENTRUP D., MÖLLER K., WUNDER E., ALHEIT K., HAHN V., MAURER H.P., REIF J.C., WÜRSCHUM T., MÜLLER J., RAHE F., RUCKELSHAUSEN A. (2013):** BreedVision — A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding, Sensors, 2013, Vol. 13, pp. 2830-2847
- DZINAJ T., KLEINE-HÖRSTKAMP S., LINZ A. RUCKELSHAUSEN A., BÖTTGER O., KEMPER M., MARQUERING J., NAESCHER J., TRAUTZ D., WISSERODT E. (1998):** Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. 19. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 10.-12.03.98, Z. PflKrankh. Pflschutz, Sonderh. XVI, 233 - 242, Stuttgart- Hohenheim

- FANOURAKIS D., BRIESE C., MAX J., KLEINEN S., PUTZ A., FIORANI F., ULBRICH A., SCHURR U. (2014):** Rapid determination of leaf area and plant height by using light curtain arrays in four species with contrasting shoot architecture. *Plant Methods*, 10:9 doi:10.1186/1746-4811-10-9
- FENDER F., HANNEKEN M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., SPICER M. (2005):** Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 40, (ISSN 0947-7314), S.7-16
- FENDER F., HANNEKEN M., IN DER STROTH S., KIELHORN A., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2006):** Sensor Fusion Meets GPS: Individual Plant Detection. *Proceedings of CIGR EurAgEng/VDI-MEG*, 2006, 279-280
- FENDER F., LANG B., MARQUERING J., RUCKELSHAUSEN A., SCHEUFLER B. (2007):** Duo-Körnerlichtschranke als bildgebendes Sensorsystem zur Charakterisierung landwirtschaftlicher Gutpartikel, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 60, 2007, S.123-128
- KIELHORN A., DZINAJ T., GELZE F., GRIMM J., KLEINE-HARTLAGE H., KLEINE HÖRSTKAMP S., KUNTZE W., LINZ A., NAESCHER J., NARDMANN M., RUCKELSHAUSEN A., TRAUTZ D., WIBERODT E. (2000):** Beikrautregulierung in Reihenkulturen – Sensorgesteuerte Querhacke im Mais; *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, Sonderheft XVII, S.207-215
- KOVACHEVA I. (2013):** Bestimmung von Pflanzenparametern unter Anwendung bildgebende Lichtgitter, Master Thesis, Hochschule Osnabrück
- MONTES J.M., TECHNOW F., DHILLON B.S., MAUCH F., MELCHINGER A.E. (2011):** High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions, *Field Crops Research*, Volume 121, Issue 2, 18 March 2011, Pages 268–273
- ROSEMAN T. (2013):** Entwicklung eines FPGA-basierten Laserzeilen-Sensorsystems mit Ethernet-Schnittstelle, Bachelor Thesis, Hochschule Osnabrück
- RUCKELSHAUSEN A., DZINAJ T., GELZE F., KLEINE-HÖRSTKAMP S., LINZ A. (1999):** Microcontroller-based multi-sensor system for online crop/weed detection. *The 1999 Brighton Conference Weeds*, 15.-18.11.99, Conference proceedings volume 2, 601 - 606, Brighton
- RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen – ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten, *Journal für Kulturpflanzen*, 66 (2). S.73-79, ISSN1876-0911, DOI: 10.5073/JFK.2014.02.06, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

Erkennung von Beikraut in Sonderkulturen durch Klassifikation von Multisensorinformation

Johannes Meyer, Christian Frese, Christian Frey

Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe

Email: christian.frese@iosb.fraunhofer.de

Zusammenfassung: Dieser Beitrag befasst sich mit der automatischen Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikraut in Sonderkulturen. Ein solches Verfahren stellt eine wichtige Komponente für einen autonomen Roboter dar, der Beikraut neben der zu kultivierenden Pflanze erkennen und entfernen kann. Ein Multisensorsystem erfasst Bild- und Entfernungsdaten von der Pflanzenkultur. Auf dieser Grundlage werden Farb-, Textur- und Entfernungsmerkmale berechnet, die als Eingabe für einen Klassifikator dienen. Die Klassifikationsleistung wird anhand realer Daten aus einer Buchsbaumkultur evaluiert.

Deskriptoren: Multisensorinformation, Merkmalsextraktion, Klassifikation, Beikrautregulierung, Robotik

Abstract: *This contribution addresses the discrimination of plants and weed in specialized cultivations. The proposed method enables automatic weed control by an autonomous robot. A multi-sensor system captures image and range data of the plants. Features based on color, texture, and range information are computed. A classifier is trained to distinguish the cultivated plants from weed. The classification performance is evaluated on real data acquired in a boxwood cultivation.*

Keywords: *multi-sensor information, feature extraction, classification, weed control, robotics*

1 Einleitung

In der Landwirtschaft stellt die Regulierung von Beikraut eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Kultivierung einer Nutzpflanze dar. Das Beikraut kann der Nutzpflanze wichtige Nährstoffe entziehen, den Lichteinfall verringern und Schädlinge anlocken, wodurch ihr Wachstum und ihre Gesundheit beeinträchtigt werden. Für eine erfolgreiche Aufzucht ist es daher notwendig, das sich in der Nähe befindliche Beikraut regelmäßig zu entfernen.

Diese Aufgabe kann entweder über den Einsatz eines Herbizids oder durch gezieltes mechanisches Entfernen erledigt werden. Die mechanische Beikrautregulierung ist heute aufgrund des hohen Arbeitsaufwands sehr kostenintensiv, weshalb häufig Herbizide bevorzugt werden. Die Automatisierung dieses Vorgangs mittels Agrar-Robotern könnte

diese Kosten langfristig signifikant senken, sodass der Einsatz von Herbiziden deutlich reduziert werden könnte. Dies hätte positive Auswirkungen sowohl auf die Nutzpflanzenkultur als auch auf Umwelt und Grundwasser.

Dieser Beitrag befasst sich mit der automatischen Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikraut in Sonderkulturen. Ein solches Verfahren stellt eine wichtige Komponente für einen autonomen Roboter dar, der Beikraut neben der zu kultivierenden Pflanze erkennen und entfernen kann. Als Beispielanwendung wird hier die Aufzucht von gemeinem Buchsbaum (*Buxus sempervirens*) in Baumschulen betrachtet. Der Buchsbaum ist eine vergleichsweise langsam wachsende Pflanze, die lange Zeit in der Baumschule verweilen muss, sodass während der Aufzucht beträchtliche Kosten für die Beikrautregulierung anfallen. Der vorgeschlagene Lösungsansatz ist jedoch allgemeingültig und lässt sich – mit entsprechenden Anpassungen – auch auf andere Pflanzenkulturen übertragen.

In der Literatur zur automatischen Beikrautdetektion werden vorwiegend bildgebende Verfahren verwendet. Dabei werden die aufgenommenen Bilder meistens mit einem Schwellwertverfahren auf einem Farbindex, der grüne Farben hervorhebt, in Vegetations- und Bodenpixel segmentiert. Um unter den Vegetationspixeln Beikraut zu erkennen, werden unter anderem Textur- und Formmerkmale verwendet (SLAUGHTER *et al.* 2008). Weiss und Mitarbeiter (WEISS *et al.* 2010) zeigten, dass allein mit Hilfe eines 3D-Laserscanners verschiedene Pflanzenarten unter kontrollierten Bedingungen mit Trefferraten von bis zu 99% unterschieden werden konnten – allerdings liegt der Fokus hier nicht auf der Erkennung von Beikraut neben einer Nutzpflanze.

Bei dem hier vorgestellten Verfahren bewegt sich ein mobiler Roboter über das Pflanzenbeet hinweg, extrahiert aus den erfassten Sensordaten diverse Merkmale und speist diese in einen zuvor trainierten Klassifikator ein. Der Klassifikator soll zwischen den drei Klassen Buchsbaum, Beikraut und Boden unterscheiden.

2 Methoden

2.1 Sensordatenerfassung

Zur Datenerfassung wurde der geländegängige omnidirektionale mobile Roboter IOSB.amp O1 mit einem Sensorkopf ausgestattet, der aus einem 2D-Laserscanner und einer RGB-Farbkamera besteht (**Bild 1**). Der Laserscanner misst die Abstände zu den Objektpunkten in der Scanebene.

Laserscanner und Kamera wurden mit Hilfe mehrerer Aufnahmen eines Schachbrettmusters in verschiedenen Posen mit dem in (ZHANG & PLESS 2004) vorgestellten Verfahren relativ zueinander kalibriert. Somit können den erfassten Objektpunkten die korrespondierenden Bildpunkte im Kamerabild zugeordnet werden (**Bild 2**). Für diese Punkte sind dann sowohl die 3D-Koordinaten relativ zum Sensorkopf als auch die RGB-Farbwerte bekannt.



Bild 1: Der mobile Roboter IOSB.amp O1 (links) und der Sensorkopf, bestehend aus 2D-Laserscanner und Kamera (rechts).



Bild 2: Für die rot markierten Bildpunkte liegen Entfernungsmessungen des 2D-Laserscanners vor.

Den in das Bildkoordinatensystem transformierten Objektpunkten wird später die vom verwendeten Klassifikator erkannte Klasse zugewiesen. Durch die Vorwärtsbewegung des Roboters entlang der Pflanzenreihe können die einzelnen Klassifikationsergebnisse zu einer kompletten Klassifikation des überfahrenen Bereichs aggregiert werden.

2.2 Merkmalsextraktion

Aus dem Bild der Kamera und den Distanzmessungen des Laserscanners können verschiedene Merkmale extrahiert werden, die zur Lösung der Klassifikationsaufgabe beitragen. Diese lassen sich in Entfernungs-, Farb- und Texturmerkmale einteilen.

2.2.1 Entfernungsmerkmale

Mit Hilfe der 3D-Daten können die Höhe über der Bodenebene und die lokale Varianz der Entfernungsdaten bestimmt und als Merkmale verwendet werden. Da die Buchsbaumblätter zusammen keine geschlossene Fläche bilden, weist das vom Laserscanner

gemessene Höhenprofil eine charakteristische Struktur auf, die sich in der Varianz der Entfernungsdaten manifestiert. Die Höhe über der Bodenebene trägt zusätzlich zur Diskriminierung zwischen Unkraut und Nutzpflanze bei, da sich das Beikraut bei regelmäßiger Entfernung stets in Bodennähe befinden sollte.

2.2.2 Farbmerkmale

Da die Beleuchtungssituation an verschiedenen Tagen aufgrund der natürlichen Sonneneinstrahlung stark variiert, müssen die Bilddaten geeignet vorverarbeitet werden, um möglichst beleuchtungsinvariante Farbmerkmale zu erhalten. Dazu wurden mittels einer Histogrammegalierung die aufgenommenen Bilder so verändert, dass die Histogramme ihrer Farbkanäle an die eines Referenzbildes angepasst werden, das repräsentativ für die Trainingsdaten ist. Die Farbwerte der vorverarbeiteten Daten werden anschließend zusätzlich in den HSV-Raum transformiert, um neben den normalisierten RGB-Kanälen auch den Farbton und die Farbsättigung als Merkmale zu verwenden.

2.2.3 Texturmerkmale

Da sowohl die Buchsbäume mit ihren dicht angeordneten und relativ kleinen Blättern, als auch die sie umgebende Erde charakteristische Texturen aufweisen, ist die Verwendung von Texturmerkmalen naheliegend. Diese werden jeweils aus einer Umgebung des zu klassifizierenden Bildpunkts berechnet. Sie charakterisieren Granularität, Regelmäßigkeit, Kontrast und Form der Strukturen in einer Bildregion.

So werden für einen zu betrachtenden lokalen Bildausschnitt Ω des gesamten Grauwertbildes $g(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in N \times N$, $N \subset \mathbb{N}$ der mittlere Grauwert

$$\bar{g}_\Omega := \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} g(\mathbf{x})$$

und die Grauwertvarianz

$$s_\Omega^2 := \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} (g(\mathbf{x}) - \bar{g}_\Omega)^2$$

berechnet (BEYERER *et al.* 2012).

Außerdem können mit Hilfe eines Richtungshistogramms Aussagen über das Auftreten von Vorzugsrichtungen unter den Gradienten des Bildausschnitts getroffen werden.

Zusätzlich werden für alle in Ω enthaltenen 3×3 -Fenster die Fourier-Koeffizienten nach der Methode aus (URSANI *et al.* 2008) berechnet und Histogramme über ihr Betrags- und Phasenspektrum gebildet, deren Einträge dann als Merkmale verwendet werden. Die Phasenwinkel der einzelnen Fourier-Koeffizienten werden dabei so korrigiert, dass eine erhöhte Rotationsinvarianz erreicht wird.

Weitere Texturmerkmale lassen sich durch die Faltung des Bildausschnitts mit den in (LAWS 1980) eingeführten Laws-Matrizen generieren. Dazu wird auf dem Faltungsergebnis

$g'(\mathbf{x})$ die Energie

$$e_{\Omega} := \sum_{\mathbf{x} \in \Omega} g'(\mathbf{x})^2$$

berechnet und als Merkmal verwendet. Die einzelnen Laws-Matrizen stellen Kombinationen von Impulsantworten verschiedener linearer Filter dar und heben unterschiedliche Bildbereiche, die beispielsweise kanten- oder wellenartige Strukturen enthalten, hervor.

Außerdem werden weitere Merkmale verwendet, die auf sogenannten lokalen Binärmustern (*Local Binary Patterns*, LBPs) basieren und invariant sind bezüglich Bildrotationen und monotonen Grauwertänderungen (OJALA *et al.* 2002). Bezüglich eines Bildausschnitts wird dabei aus den Grauwertdifferenzen zwischen auf einem Kreis angeordneten Pixeln und dem Pixel im Kreiszentrum ein Vektor gebildet, der lediglich die Vorzeichen der Differenzen beinhaltet. Für diese Vektoren werden wiederum Histogramme über eine lokale Umgebung Ω des betrachteten Bildpunkts berechnet, deren Einträge als Merkmale verwendet werden.

Die Wahl geeigneter Fenstergrößen für die Gewinnung der verschiedenen Texturmerkmale spielt eine entscheidende Rolle. Ein großes Fenster führt zu einer erhöhten Robustheit gegenüber kleinen Störungen, reduziert allerdings auch die Ortsauflösung des jeweiligen Merkmals. Die Fenstergrößen wurden daher in Anlehnung an das in Abschnitt 2.3 vorgestellte Verfahren schrittweise optimiert.

2.2.4 Merkmalsselektion

Um aus den zuvor beschriebenen Merkmalen eine in Hinsicht auf Klassifikationsleistung und -geschwindigkeit optimale Teilmenge zu gewinnen, wird ein Verfahren angewandt, bei dem die Merkmale schrittweise ausgewählt werden.

Beginnend mit einer leeren Menge werden alle verfügbaren Merkmale einzeln auf ihre Klassifikationsleistung getestet. Das bestplatzierte Merkmal wird der Menge der ausgewählten Merkmale hinzugefügt. Nun wird wiederum die Klassifikationsrate jedes verbleibenden Merkmals zusammen mit dem bereits ausgewählten bestimmt. Wieder wird das Merkmal mit der höchsten Klassifikationsrate ausgewählt und der finalen Menge hinzugefügt. Dieser Schritt wird so oft ausgeführt, bis alle Merkmale verwendet wurden. Ausgewählt wird nun diejenige der untersuchten Merkmalsmengen, welche die maximale Klassifikationsleistung aufweist.

2.3 Klassifikation

Zur Klassifikation wurde eine *Support Vector Machine* (SVM) trainiert, wobei die Klassentrennbarkeit durch eine Transformation in einen höherdimensionalen Raum mittels radialer Basisfunktionen verbessert wird (CHANG & LIN 2011).

In dieser Konfiguration besitzt die SVM zwei freie Parameter, die durch die folgende Methode optimiert werden. Für beide Parameter wird ein Raster äquidistanter Stützstellen erstellt, das einen breiten Bereich von sinnvollen Werten abdeckt. Nun wird für jede mögliche Kombination von Parameterwerten innerhalb des Rasters die Klassifikationsleistung der SVM getestet und das beste Paar ausgewählt. Dieser Schritt wird mit einem feineren Raster im Wertebereich des besten vorherigen Parametertupels so oft wiederholt, bis keine signifikante Verbesserung mehr festzustellen ist.

Die gesamte Verarbeitungskette aus Sensordatenerfassung, Merkmalsextraktion und Klassifikation liefert letztlich eine 3D-Punktwolke, in der jedem Punkt die ermittelte Klasse Nutzpflanze, Beikraut oder Boden zugewiesen wird.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Testdaten

Zur Evaluation des Verfahrens wurden Daten eines Beets mit zehn Buchsbäumen aufgenommen. Dabei wurden die Aufnahmen der ersten bzw. der letzten fünf Pflanzen zu zwei Datensätzen zusammengefasst, die wahlweise als Trainings- oder Testdaten zum Einsatz kamen. Zusätzlich wurden zum Trainieren bzw. Testen des Klassifikators Daten von verschiedenen Tagen und somit unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen verwendet. Durch diese Vorgehensweise soll die im realen Einsatz zu erwartende Variabilität der Umgebungsbedingungen möglichst gut repräsentiert werden. Die Klassenzugehörigkeit der aufgenommenen Daten wurde durch manuelles Beschriften bestimmt. Datenpunkte, die keiner der definierten Klassen eindeutig zugeordnet werden konnten, fanden beim Training keine Beachtung. Ihnen wurden für eine spätere Evaluierung dennoch die Klasse zugeordnet, der sie idealerweise zugeordnet werden sollten. Beispielsweise wurden die Daten eines Laubblatts, das auf einem Buchsbaum liegt, nicht zum Trainieren des Klassifikators verwendet. Allerdings sollte das Blatt im realen Einsatz nicht als Unkraut, sondern als Buchsbaum identifiziert werden, da der Baum sonst unnötigerweise beschädigt werden könnte.

Über mehrere Monate verteilt wurden fünf Datensätze aufgenommen, aus denen insgesamt 1.440 Bilder entnommen wurden. Daraufhin wurde manuell die Klassenzugehörigkeit von ca. 273.600 Bildpunkten bestimmt, die dann als Trainings- bzw. Testdaten verwendet wurden.

3.2 Merkmalsbewertung

Zur Bewertung der Merkmale wurden aus den verfügbaren Datensätzen zufällig ein Trainings- und ein Testdatensatz ausgewählt. Um einzelne Merkmalsgruppen bewerten zu können, wurde die Klassifikationsleistung der SVM anhand dieser Daten unter Verwendung der entsprechenden Merkmale evaluiert. **Bild 3** zeigt die resultierenden Korrektklassifikationsraten. Die Ergebnisse verdeutlichen den Gewinn durch die multisensorielle Datenerfassung. Zur zusätzlichen Verifikation der Merkmalsgüte wurden in Anlehnung an Fishers Lineare Diskriminanzanalyse für jedes Merkmal der sogenannte Streuquotient aus Inter- und Intraklassenstreuung gebildet. Die erhaltenen Werte bestätigten im Wesentlichen die dargestellten Ergebnisse.

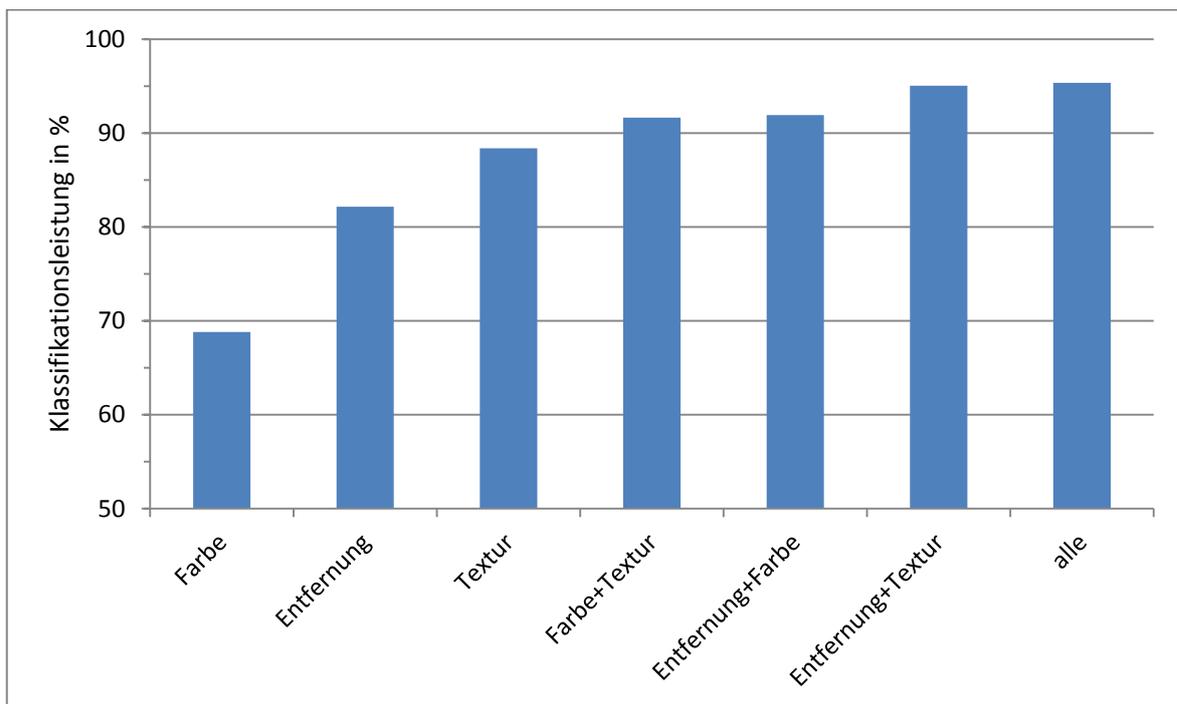


Bild 3: Korrektklassifikationsrate in Abhängigkeit der verwendeten Merkmalsgruppen.

3.3 Klassifikationsergebnisse

Die mit diesem Verfahren ermittelte durchschnittliche Erkennungsrate liegt bei 95,41%. Dabei werden 0,39% der Buchsbaumpixel fälschlicherweise als Beikraut identifiziert und 87,2% des Beikrauts wird korrekt als solches erkannt. **Bild 4** zeigt ein Bild aus dem Datensatz mit visualisierten Klassifikationsergebnissen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur automatischen Beikrautererkennung in Sonderkulturen vorgestellt. Mit Hilfe eines kalibrierten Multisensorsystems werden Bild- und 3D-Daten gewonnen. Basierend auf einer systematischen Evaluation wurden geeignete Merkmale ausgewählt, die als Eingabe für einen Klassifikator dienen. Auf Grundlage der

Klassifikationsergebnisse und des erstellten 3D-Modells ist die automatische Entfernung des Beikrauts durch einen an der Roboterplattform angebrachten Manipulator möglich. Der Manipulator für die Anwendung in der Baumschule wird derzeit von unseren Projektpartnern entwickelt. Die gewonnenen Daten eröffnen zusätzlich auch die Möglichkeit für andere Anwendungen, z.B. die Bonitur des Nutzpflanzenzustands oder den Formschnitt der Pflanzen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Verbundprojekts „AgriApps“, Förderkennzeichen 01IM12002C.



Bild 4: Beispiel für die Klassifikationsergebnisse. Rot gekennzeichnete Punkte wurden als Unkraut erkannt, schwarze als Erde und grüne als Buchsbaum.

Literaturverzeichnis

- BEYERER J., PUENTE LEÓN F., FRESE C. (2012):** Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer Vieweg
- CHANG C., LIN C. (2011):** LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. 2(3):27
- LAWS K. (1980):** Rapid texture identification. *Proceedings of the Seminar on Image Processing for Missile Guidance*. 376-380. SPIE
- OJALA T., PIETIKÄINEN M., MÄENPÄÄ T. (2002):** Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7):971–987
- SLAUGHTER D.C., GILES D.K., DOWNEY D. (2008):** Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 61(1):63-78
- URSANI A.A., KIDIYO K., JOSEPH R. (2008):** Texture features based on local Fourier histogram: self-compensation against rotation. *Journal of Electronic Imaging*. 17(3)

WEISS U., BIBER P., LAIBLE S., BOHLMANN K., ZELL A. (2010): Plant species classification using a 3d lidar sensor and machine learning. 9th International Conference on Machine Learning and Applications. 339-345

ZHANG Q., PLESS R. (2004): Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration). International Conference on Intelligent Robots and Systems. 3:2301-2306

Verbesserte Identifikation landwirtschaftlicher Kulturen in Nordisrael durch Einbeziehung der Phänologie aus RapidEye-Daten

Florian Beyer¹, Thomas Jarmer¹, Bastian Siegmann¹, Sascha Klonus², Yael Etzion³, David Broday³

¹ Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück, 49076 Osnabrück

² DVZ-MV, Sachgebiet Geoinformation, 19059 Schwerin

³ Technion, Israel Institute of Technology, Department of Environmental, Water and Agricultural Engineering, Haifa, Israel

Email: fbeyer@igf.uos.de

Zusammenfassung: Eine hochgenaue Landnutzungs- und Landbedeckungsklassifikation (LU/LC) landwirtschaftlicher Kulturen auf Basis von Fernerkundungsdaten stellt noch immer eine große Herausforderung dar. Oftmals müssen unterschiedliche landwirtschaftliche Kulturen zu Oberklassen zusammengefasst werden, damit Klassifikationen auf Grundlage multispektraler Satellitendaten akzeptable Genauigkeiten erreichen. Mit der steigenden Verfügbarkeit und gleichzeitig verbesserten räumlichen Auflösung von Satellitendaten, kommt der multitemporalen Analyse von Fernerkundungsdaten immer mehr Bedeutung zu. Dabei wird sich der Sachverhalt zu Nutze gemacht, dass verschiedene Pflanzen einen unterschiedlichen phänologischen Verlauf besitzen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine hochgenaue Klassifikation landwirtschaftlicher Flächen durch die multitemporale Analyse multispektraler RapidEye-Daten. Dabei wurde das Trennbarkeitsmaß *Jeffries-Matusita Separability* (JM) genutzt um den besten multitemporalen Datensatz aus den verfügbaren einzelnen Aufnahmezeitpunkten zu ermitteln. Die spektrale Trennbarkeit der 16 vorhandenen Klassen ergab für den ermittelten multitemporalen Datensatz bestehend aus drei Aufnahmezeitpunkten (Oktober 2012, Januar und März 2013) nur eine kritische Klassenpaarung. Für die Klassifikation wurden die Klassifikationsalgorithmen *Maximum Likelihood* (ML) und *Support Vector Machine* (SVM) vergleichend gegenübergestellt. Beide Algorithmen lieferten Gesamtklassifikationsgenauigkeiten von über 90%. Die SVM erwies sich dabei mit 96,13% Klassifikationsgenauigkeit zwar als geringfügig genauer, jedoch erfolgte die ML-Klassifikation (94,83%) in deutlich geringerer Zeit (um Faktor 5 schneller).

Deskriptoren: Multitemporale Klassifikation, LU/LC, Landnutzung, Landbedeckung, RapidEye

Abstract: *Accurate Land use/Land cover classification (LU/LC) of agricultural crops still represents a major challenge in the field of multispectral remote sensing. In order to obtain acceptable classification accuracies on the basis of multispectral satellite data, merging crops in rather broad classes is often necessary. With regard to the rising availability as well as the improving spatial resolution of satellite data, multitemporal*

analyses become increasingly important for remote sensing investigations. In order to identify spectrally similar crops, multi-date satellite images consider different growth characteristics during the phenological period. The present study aims to investigate a way to perform highly accurate classifications with numerous agricultural classes using multitemporal RapidEye data. Therefore, the Jeffries-Matusita separability was used for applying a pre-procedure in order to find the best multitemporal setting of all available images within one crop cycle. Only one critical class pairing out of 120 (16 classes) occurred using the best multitemporal data set. For classification the Maximum Likelihood (ML) classifier and the Support Vector Machine (SVM) were compared using the most suitable multitemporal image. Both algorithms indicated very high classification accuracies of over 90% for all 16 classes. SVM was slightly better with a classification accuracy of 96.13%. ML provided a result of 94.83% correct classified pixel. However, the processing time of ML was significantly shorter compared to SVM, in fact by a factor of five.

Keywords: multitemporal classification, LU/LC, land use, land cover, RapidEye

1 Einleitung

Die Landnutzung bildet die Basis für unterschiedlichste Fragestellungen der Planung, des Ressourcenmanagements, der Identifikation von Umweltveränderungen oder hinsichtlich ökosystemarer Vorhersagen (KHAN *et al.* 2012). Eine großräumige Erfassung der Landnutzung allein durch terrestrische Erhebungen ist jedoch zeitkritisch und kostenintensiv. Daher kommt der Landnutzungsklassifikation aus Fernerkundungsdaten eine große Bedeutung zu. Allerdings stellt eine fernerkundliche Klassifikation landwirtschaftlicher Kulturen noch immer eine große Herausforderung dar (MULLA 2013, LU & WENG 2007). Die Vorteile multispektraler Satellitendaten sind unter anderen die weiträumige Abdeckung, die operationale Handhabung und die vergleichsweise niedrigen Beschaffungskosten (ARAÚJO *et al.* 2011). Jedoch haben sie oft nicht die erforderliche spektrale Auflösung, um verschiedene Kulturen komplett voneinander trennen zu können. Zudem besitzen unterschiedliche Vegetationsarten einen spektral sehr ähnlichen Verlauf und die Unterschiede innerhalb eines Schlages können größer sein als die Unterschiede zwischen verschiedenen Kulturen (THENKABAIL *et al.* 2011). Hyperspektrale Daten erlauben zwar genauere Differenzierungen, haben jedoch eine geringe räumliche Abdeckung, sind kostspielig und die Sensoren bisher überwiegend flugzeuggetragen (GOETZ 2009, SCHAEPMAN *et al.* 2009). Ziel ist es die Vorteile beider Aufnahmetechniken synergetisch zu verbinden. Eine chronologisch kontinuierliche Akquirierung multispektraler Satellitendaten erlaubt durch Aneinanderreihung der einzelnen Aufnahmen eine Analyse der zeitlichen Entwicklung des zu betrachtenden Objektes. Gleichzeitig erfährt der Bilddatensatz dadurch eine Erhöhung der spektralen Information. Auf diese Weise entsteht ein sogenannter multitemporaler Satellitenbild-Datensatz. Bisherige, auf multitemporale Analysen basierende Arbeiten (WONDRADE *et al.* 2014, DEMIR *et al.* 2013, MURAKAMI *et al.* 2001), widmeten sich größtenteils multispektralen Daten mit relativ ge-

ringer räumlicher Auflösung (z.B. Modis, Landsat) oder multitemporalen Analysen von RADAR-Daten (VICENTE-GUIJALBA *et al.* 2014, ASKNE *et al.* 2013) mit einer geringen Anzahl von landwirtschaftlichen Kulturen oder Oberklassen (GUERSCHMAN *et al.* 2003, OETTER *et al.* 2001).

Die fünf baugleichen Erdbeobachtungs-Satelliten von RapidEye erlauben eine Abdeckung der gleichen Gebiete in hoher zeitlicher Frequenz (tägliche Wiederholrate) bei gleichzeitiger hoher räumlicher Auflösung (5m am Boden). Somit erhält die zeitliche Komponente eine entscheidende Rolle für die multispektrale Datenanalyse von Vegetation (MURTHY *et al.* 2003, STUCKENS *et al.* 2000, PANIGRAHY & CHAKRABORTY 1998). In der vorliegenden Studie wurde das Potential multitemporaler RapidEye-Daten für die flächenscharfe Abgrenzung und Klassifikation landwirtschaftlicher Flächen analysiert. Dabei soll gezeigt werden, dass aufgrund der spektralen Ähnlichkeit landwirtschaftlicher Kulturen erst durch die Berücksichtigung der phänologischen Entwicklung anhand von multitemporalen Satellitenbildern eine verbesserte Differenzierung der Kulturen bzw. überhaupt erst eine Differenzierung spektral ähnlicher Kulturen (Klassen) ermöglicht wird.

2 Untersuchungsgebiet und Daten

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Norden Israels und erstreckt sich von der Bucht von Haifa bis in die Jesreelebene (**Bild 1** links). Das Gebiet zwischen Haifa und Nazareth bildet eines der Hauptanbaugebiete der israelischen Landwirtschaft. Die Region ist durch ein mediterranes Klima (IMS 2014) mit heißen, trockenen Sommern und kühlen, regnerischen Wintern charakterisiert (**Bild 1** rechts). Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt etwa 538 mm Niederschlag und fällt in den Monaten September bis Mai. Die naturräumlichen Gegebenheiten erlauben - häufig auch durch Bewässerungswirtschaft - den Anbau zweier landwirtschaftlicher Kulturen innerhalb eines Jahres.

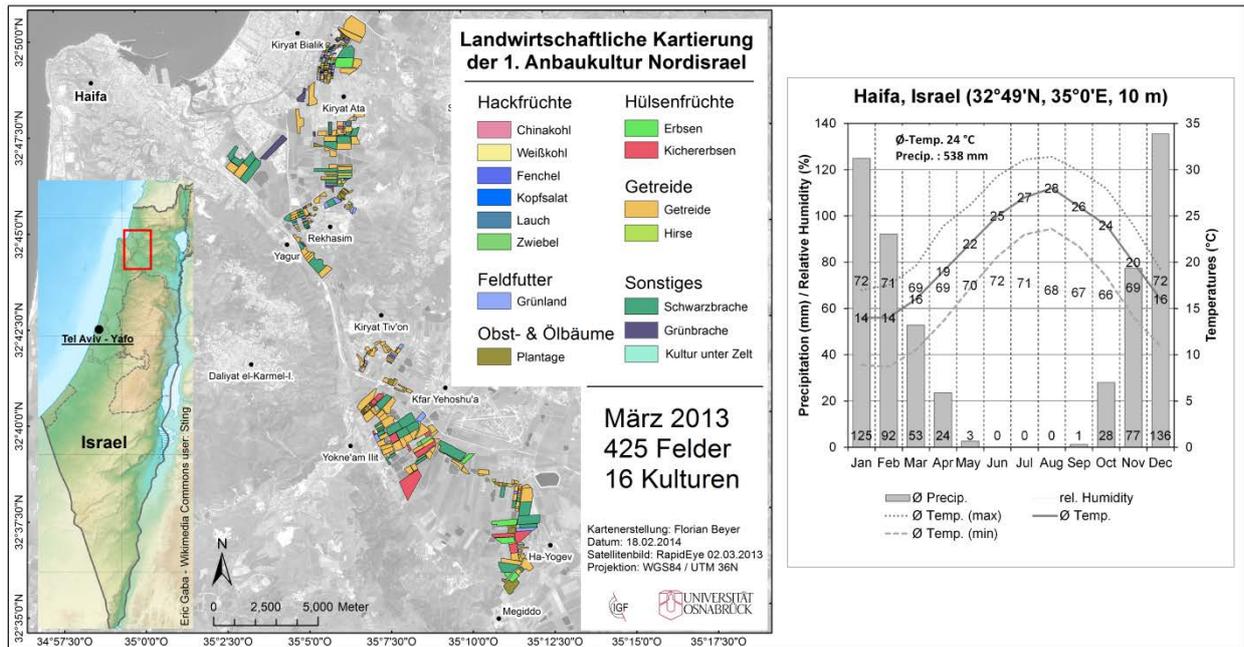


Bild 1: Links: Untersuchungsgebiet in Nordisrael mit Landnutzungskartierung aus März 2013. Rechts: Klimadiagramm von Haifa (IMS 2014).

2.2 Landnutzungskartierung

Im Folgenden soll die Landnutzung in der Region während der ersten Anbauphase von Oktober 2012 bis März 2013 untersucht werden. Diese Anbauphase wurde von Getreide (vorrangig Roggen und Hafer) und Kichererbsen dominiert. Des Weiteren traten kleinere Flächen verschiedener Kulturen (Erbsen, Tomaten, verschiedene Kohl- und Salatarten) auf. Zur Validierung der Klassifikation wurde im März 2013 eine umfangreiche Feldkampagne durchgeführt. Dabei wurden 485 Schläge erfasst und die Kulturen bestimmt (**Bild 1** links). Bei der Kartierung wurden 16 unterschiedliche Landnutzungsclassen erfasst. Die zweite Anbauphase beginnt je nach Kulturwechsel fließend im April und endet im Verlaufe ansteigender Temperaturen und steigender Aridität ab August (**Bild 1** rechts). Aufgrund der heißen und trockenen Monate beginnend im Juni liegt die Landwirtschaft von August bis Oktober brach. Eine Sonderstellung besitzen die Obst- und Ölbaumplantagen (u.a. Avocados, Oliven, Zitrusfrüchte, Pfirsiche), da diese perennen Kulturen in beiden Anbauphasen und auch während der Brachzeit bestehen bleiben.

2.2 Satellitendaten

Die fünf baugleichen Satelliten von RapidEye befinden sich auf einem ähnlichen sonnensynchronen Orbit. Die an Bord installierten Multispektralkameras haben fünf Kanäle im Spektralbereich zwischen 440 und 850 nm. **Tabelle 1** zeigt die Bereiche in denen die einzelnen Kanäle der Sensoren die von der Erde reflektierte elektromagnetische Strahlung erfassen.

Tabelle 1: Spektrale Kanäle der fünf baugleichen RapidEye-Sensoren.

	Kanal	Wellenlänge in nm
1	Blau	510 – 440
2	Grün	590 – 520
3	Rot	685 – 630
4	<i>Red Edge</i>	730 – 690
5	Infrarot	760 – 850

Die ersten drei Kanäle decken den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes ab und der fünfte Kanal liegt im nahen Infrarot. Die Besonderheit der RapidEye-Sensoren liegt im vierten Kanal, der als *Red Edge*-Kanal bezeichnet wird. Dieser Kanal deckt einen engen Spektralbereich im elektromagnetischen Spektrum ab, der sich besonders gut zur Analyse der Vegetationsentwicklung eignet (WEICHELT *et al.* 2013, THENKABAIL *et al.* 2011). Die Beschaffung der Daten wurde über ein RESA-Projekt realisiert (RESA 597). Die Daten wurden von der Firma RapidEye geometrisch und orthometrisch als Level 3A-Produkte ausgeliefert und am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt mithilfe von CATENA¹ und ATCOR atmosphärisch korrigiert. Für die Klassifikation standen drei Aufnahmezeitpunkte (Oktober 2012, Januar 2013, März 2013) mit jeweils einem räumlichen Mosaik aus zwei RapidEye-Kacheln (pro Kachel 500 km²) zur Verfügung.

3 Methodik

Die Flächen der Kartierung wurden in einen Trainings- und einen Testdatensatz geteilt, um eine unabhängige Validierung zu gewährleisten. Anschließend erfolgte vor der eigentlichen Klassifikation eine Trennbarkeitsanalyse der Trainingsgebiete auf den monotonalen und auf den multitemporalen Datensätzen. Für die letztere Trennungsanalyse wurden die drei Aufnahmezeitpunkte zu zwei unterschiedlichen multitemporalen Datensätzen zusammengefasst. Einerseits wurden die Monate Januar und März aneinander gereiht, so dass ein 10-kanaliger Datensatz entstand (Stack-1), um die erste Anbauphase zu erfassen. Andererseits sollte durch einen zweiten multitemporalen Datensatz (Stack-2) bestehend aus drei Zeitpunkten zusätzlich die Boden- bzw. Brache-Information von Oktober 2012 Berücksichtigung finden (15-kanaliger Datensatz) und untersucht werden, ob diese einen Mehrwert bringt.

¹ Infos siehe: http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5444/9113_read-17838/

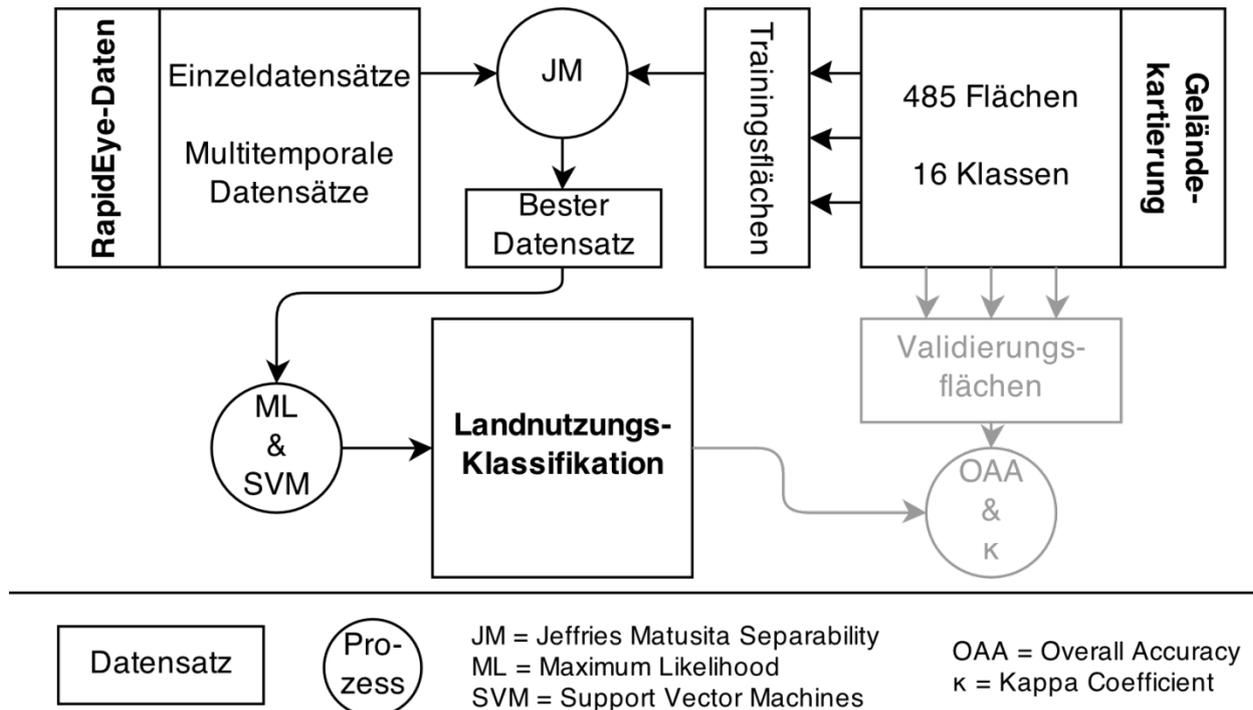
**Bild 2:** Workflow.

Tabelle 2 gibt die Anzahl der verwendeten Pixel pro Klasse für den Trainings- und den Testdatensatz an. Aufgrund der sehr kleinen und nur vereinzelt vorkommenden Felder mit den Kulturen Chinakohl, Kopfsalat und Lauch konnten diesen Klassen nur vergleichsweise wenige Pixel zugeordnet werden. Nach RICHARDS (2012) sollte das Verhältnis zwischen der Anzahl der Kanäle (N) und der Trainingspixel ein Minimum von:

$$\frac{1}{2} N(N + 1) \quad (1)$$

betragen. Die Klassen für Stack-2 mit 15 Kanälen sollten somit mindestens 120 Pixel besitzen. Da dies nicht gewährleistet werden konnte, sind die Ergebnisse dieser Klassen nur begrenzt aussagekräftig. Aus **Tabelle 2** ist weiterhin eine klare Dominanz an Getreide, Kichererbsen, Grünland und Baumplantagen ersichtlich. Zusätzlich sind die Grün- und Schwarzbrachen in der ersten Anbauphase stark vertreten.

Tabelle 2: Anzahl an Trainings- und Validierungspixeln pro Klasse.

Klasse	Anzahl Training	Anzahl Validierung	Klasse	Anzahl Training	Anzahl Validierung
Chinakohl	66	23	Getreide	97.598	42.667
Weißkohl	218	154	Hirse	429	113
Fenchel	337	99	Grünland	12.551	3.153
Kopfsalat	35	8	Plantage	13.505	5.231
Lauch	92	20	Grünbrache	13.029	5.967
Zwiebel	2.677	1.448	Schwarzbrache	94.161	37.293
Erbse	16.630	5.997	Kultur unter Zelt	237	168
Kichererbse	41.005	8.541	Summe	292.570	110.882

3.1 Spektrale Trennbarkeit

Damit keine zeit- und rechenintensiven Klassifikationen mit allen mono- und multitemporalen Datensätzen durchgeführt werden musste, wurde ein Trennbarkeitsmaß auf Basis des Trainingsdatensatzes für alle 16 Klassen berechnet (**Bild 2**). Die *Jeffries-Matusita Separability* (JM) ist ein etabliertes Maß, um Spektren verschiedener Klassen auf ihre Trennbarkeit zu testen (RICHARDS 2012, SWAIN 1972, WACKER & LANDGREBE 1972, WACKER 1971). Die JM basiert auf der Berechnung der Distanz zweier Wahrscheinlichkeitsverteilungen (spektrale Klassen) und ist definiert als:

$$J_{ij} = \int_x \left\{ \sqrt{p(x|\omega_i)} - \sqrt{p(x|\omega_j)} \right\}^2 dx \quad (2)$$

wobei $p(x|\omega_i)$ und $p(x|\omega_j)$ die Werte der i -ten und j -ten Wahrscheinlichkeitsverteilung der jeweiligen spektralen Klasse an der Position x sind. Dies stellt die mittlere Distanz zwischen den Dichtefunktionen der zwei Klassen dar. Für normal verteilte Klassen ergibt sich daraus:

$$J_{ij} = 2(1 - e^{-B}) \quad (3)$$

wobei:

$$B = \frac{1}{8} (m_i - m_j)^t \left\{ \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2} \right\}^{-1} \times (m_i - m_j) + \frac{1}{2} \left\{ \frac{|(\sigma_i + \sigma_j)/2|}{|\sigma_i|^{1/2} |\sigma_j|^{1/2}} \right\} \quad (4)$$

und nach KAILATH (1967) als *Bhattacharyya*-Distanz bezeichnet wird. Die Exponentialgleichung 3 impliziert einen asymptotischen Verlauf gegen zwei (**Bild 3**).

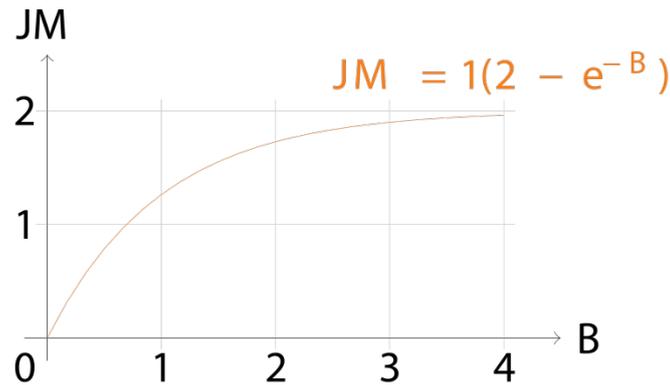


Bild 3: Asymptotischer Verlauf der *Jeffries-Matusita-Separability*.

Dabei ist B (**Gleichung 3**) als Distanzmaß der entscheidende Term, der die Trennbarkeit der betrachteten Klassen angibt. Zwei Klassen gelten als vollständig trennbar ab einem JM-Wert von 1,9. Da jede Klasse ($n = 16$) mit jeder verglichen werden musste, ergaben sich 120 Klassenpaarungen nach der Formel:

$$\binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!} \quad (4)$$

Alle Distanzen der 120 Klassenpaarungen wurden mit der JM für alle mono- und multi-temporalen Datensätze berechnet.

3.2 Klassifikation

Die Trennbarkeitsanalyse sollte die Unterscheidungsmöglichkeiten der einzelnen Landnutzungsklassen anhand der (multitemporalen) RapidEye-Daten aufzeigen. Gleichzeitig bildete der Datensatz, der in der Trennbarkeitsanalyse die besten Ergebnisse geliefert hat, die Grundlage für die folgende Klassifikation. Die eigentliche Klassifikation wurde vergleichend mit zwei unterschiedlichen Algorithmen durchgeführt. Mit dem *Maximum Likelihood*-Klassifikator (ML) wurde ein statistischer Algorithmus gewählt (KHAN *et al.* 2012), der für multispektrale Daten breite Anwendung findet. Gegenüber einfachen Distanzmaßen, wie dem *Minimum Distance*-Klassifikator, werden beim ML die zu klassifizierenden Pixel nach ihrer wahrscheinlichsten Zugehörigkeit einer Klasse zugeordnet (JONES & VAUGHAN 2010). Der ML gilt als besonders geeignet für multispektrale Daten (LU & WENG 2007), da diese eine Normalverteilung für alle Klassen gewährleisten, sofern die Trainingsgebiete groß genug gewählt wurden.

Als zweiter Klassifikator wurde mit dem *Support Vector Machines*-Algorithmus (SVM) ein moderner Klassifikator gewählt. SVM zählt zu den nicht-parametrischen Klassifikatoren des maschinellen Lernens. Entwickelt wurde die SVM von VAPNIK (1995) und in die Fernerkundung von GUALTIERI & CROMP (1998) eingeführt. Der Algorithmus sucht in einem transformierten höher dimensionalen Raum lineare Hyperebenen, die die gegebenen Klassen von einander optimal trennen. Da die Transformation in höher dimensi-

onale Räume sehr rechen- und zeitintensiv ist, kommt der sogenannte Kerneltrick zur Anwendung, der bei SMOLA & SCHÖLKOPF (2004) näher beschrieben wird. Dieser Ansatz gilt als besonders geeignet für spektral höher dimensionale Daten (vor allem hyperspektrale Daten), bei denen die Normalverteilung für einzelne Klassen nicht gewährleistet werden kann (JONES & VAUGHAN 2010). Es wurde erwartet, dass durch die Aneinanderreihung der RapidEye-Daten und der damit einhergehenden Erhöhung der spektralen Dimensionalität, eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit durch die SVM erreicht werden kann.

3.3 Validierung

Die Klassifikationsergebnisse wurden mithilfe des erstellten Testdatensatzes validiert. Zur Beurteilung der Klassifikationsgenauigkeit wurden die *Overall Accuracy* (OAA) und der Kappa-Koeffizient (κ) errechnet (RICHARDS 2012, CONGALTON & GREEN 2008, FOODY 2002, CONGALTON 1991). Die OAA ergibt sich aus dem Verhältnis der korrekt klassifizierten Pixel und der Pixelanzahl der im Gelände kartierten landwirtschaftlichen Flächen:

$$\text{OAA (\%)} = \frac{\sum \text{Klassifizierte Pixel Klasse } X}{\sum \text{Pixel Validierungsdatensatz}} \quad (5)$$

κ ist ein komplexeres Maß, das die klassifizierten Pixel vor dem Hintergrund einer zufällig korrekten Zuweisung bewertet:

$$\kappa = \frac{N \times \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (6)$$

wobei r die Anzahl der Zeilen der Fehlermatrix, x_{ii} die Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel, x_{i+} die Summe aller klassifizierten Pixel einer Zeile, x_{+i} die Summe aller Pixel einer Spalte und N die Summe aller Pixel der Matrix ist. Der κ -Wert berücksichtigt somit auch die Fälle zufällig richtig klassifizierter Pixel. Er besitzt einen Wertebereich zwischen null und eins, wobei bei eins alle Pixel richtig klassifiziert wurden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Spektrale Trennbarkeit

Die 16 kartierten Klassen wurden zunächst auf Basis der mono- und multitemporalen Datensätze hinsichtlich ihrer spektralen Trennbarkeit untersucht. In **Tabelle 3** ist die schrittweise Veränderung der spektralen Trennbarkeit von landwirtschaftlichen Klassen vom monotemporalen zu den multitemporalen Datensätzen dargestellt.

Tabelle 3: Monotemporale und multitemporale spektrale Trennbarkeit der 16 Klassen. (JM = Jeffries-Matusita-Separability, Intervall zwischen 0 und 2, Klassen ab 1,9 sind trennbar.)

Aufnahmen	Anzahl Datensätze	Klassenanzahl	Paarungen untrennbar	Schlechtester JM-Wert
Okt 2012	1	16	90	0,304
Jan 2013	1	16	61	0,551
Mar 2013	1	16	41	0,614
Stack-1	2	16	10	1,575
Stack-2	3	16	1	1,884

Der Datensatz aus Oktober 2012 zeigte mit Abstand die schlechtesten Trennbarkeitsergebnisse. Die Monate Juni bis Oktober sind die trockensten im Norden Israels (**Bild 1** rechts). Im Untersuchungsgebiet werden in dieser Jahreszeit mittlere Monatstemperaturen von 24°C erreicht und die Niederschlagsmenge ist extrem niedrig. Daher liegen die landwirtschaftlichen Flächen zu dieser Zeit brach und die einzelnen Klassen sind folglich nicht zu unterscheiden, so dass von 120 Paarungen 90 als schlecht trennbar deklariert werden.

Der zweite Datensatz (Januar 2013) nimmt eine mittlere Position in der phänologischen Entwicklung der ersten Anbauphase ein. Manche Kulturen sind im Wachstum weit fortgeschritten, während sich andere noch im Frühstadium befinden. Aufgrund des sehr ähnlichen spektralen Verlaufs der Vegetationsspektren in dieser Phase können viele Klassen noch nicht zufriedenstellend unterschieden werden. Folglich haben nur 59 der 120 Klassenpaarungen einen JM-Faktor über 1,9 und 61 Paarungen können nicht zufriedenstellend getrennt werden.

Zum dritten Zeitpunkt im März 2013, dem Monat der Kartierung, beginnt der überwiegende Teil des Getreides Ähren zu schieben und auch die meisten Hackfrüchte befindet sich im Reifestadium. Zu diesem Zeitpunkt ist die beste Trennbarkeit der Klassen zu erwarten. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass es zu 41 schlecht trennbaren Paarungen kommt. Offensichtlich konnte mit den verfügbaren monotemporalen Datensätzen nur eine eingeschränkte Differenzierung der landwirtschaftlichen Kulturen erreicht werden.

Resultierend daraus, sollte eine chronologische Aneinanderreihung der monotemporalen Datensätze (Okt 2012, Jan 2013, Mar 2013) durchgeführt werden. Der entstehende multitemporale Bilddatensatz berücksichtigt die phänologische Entwicklung der landwirtschaftlichen Kulturen als zusätzlichen differenzierenden Faktor. **Bild 4** zeigt, wie dadurch auch die spektrale Dimensionalität des Bilddatensatzes erweitert wird.

Zur Analyse der Trennbarkeit wurden zunächst Januar und März 2013 (Stack-1) zu einem Datensatz zusammengefasst. Der neu entstandene multitemporale Datensatz enthält dadurch 10 Kanäle. Schon diese Erweiterung der spektralen Information ergibt eine maßgebliche Verbesserung der Trennbarkeit. Die Anzahl der schlecht trennbaren Paa-

rungen sinkt auf zehn (**Tabelle 3**). Des Weiteren wird deutlich, dass selbst der JM-Faktor der schlechtesten Paarung (1,575) im Vergleich zur Trennbarkeitsanalyse der monotemporalen Datensätze einen enormen Anstieg erfahren hat. Dies deutet darauf hin, dass die zeitliche Komponente bzw. die Phänologie einen erheblichen Einfluss auf die Trennbarkeit besitzt.

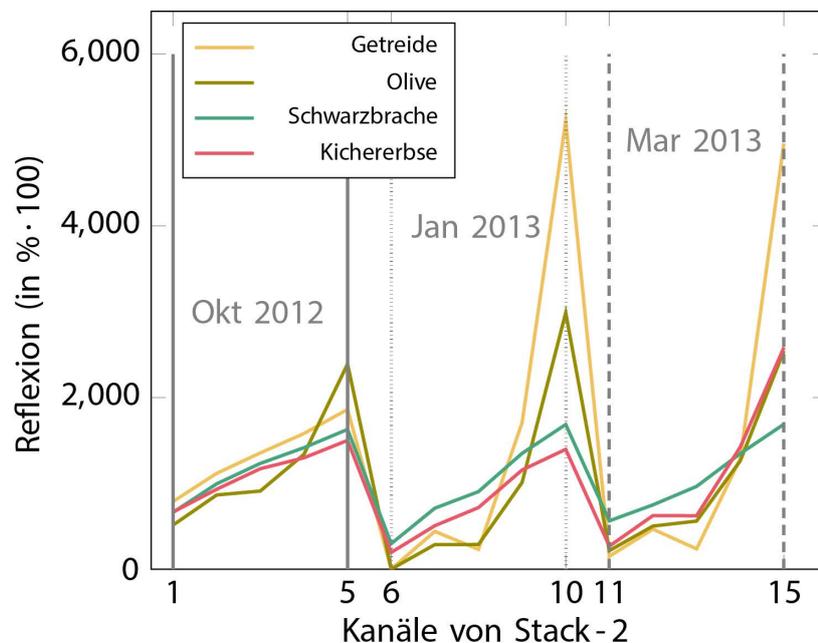


Bild 4: Asymptotischer Verlauf der *Jeffries-Matusita-Separability*

Im finalen Schritt wurde der Oktober-Datensatz aus 2012 als zusätzliche Boden- beziehungsweise Brache-Information an den Anfang des multitemporalen Datensatzes gesetzt, sodass Stack-2 aus 15 Kanäle bestand. Die Zusatzinformation aus der Brachezeit verbesserte die Trennbarkeit in hohem Maße (**Tabelle 3**). **Bild 4** zeigt exemplarisch die Entwicklung drei verschiedener Kulturen und den gleichbleibenden spektralen Verlauf des Bodens (Schwarzbrache) über die gesamte erste Anbauphase (Oktober 2012, Januar 2013 und März 2013). Getreide entwickelt ein deutlich trennbares spektrales Signal. Im März 2013 sind die spektralen Verläufe von Oliven und Kichererbsen (**Bild 4**, Mar 2013, Kanäle 11 bis 15) relativ gleich. Da Olivenbäume jedoch perenne Pflanzen sind, blieb ihr Blattwerk im heißen und ariden Oktober erhalten (**Bild 4**, Okt 2012, Kanäle 1 bis 5) und somit auch der spektrale Vegetation-Verlauf. Ebenso unterscheidet sich das spektrale Signal von Kichererbsen erst in der letzten Aufnahme (Mar 2013) von dem der Schwarzbrache. Beim Test auf spektrale Trennbarkeit existierte nun nur noch eine problematische Paarung (**Tabelle 3**). Bei den beiden Klassen handelte es sich um Zwiebeln und Grünbrache. Grünbrachen besitzen aufgrund ihrer sukzessiven Vegetationsentwicklung eine sehr heterogene Verteilung von Pflanzen und Boden. Durch die räumliche Auflösung des RapidEye-Sensors von fünf Metern (ein Pixel = 25 m²), kommt es dadurch zu Mischsignalen. Zwiebeln werden in Reihen angebaut und haben daher

ebenfalls einen hohen Anteil an Boden im Spektralsignal. Da diese Paarung als problematisch identifiziert wurde ist daher nachvollziehbar. Ein JM-Faktor von 1,884 lässt jedoch trotzdem eine moderate Trennung der zwei Klassen erwarten.

4.2 Klassifikation

Im Anschluss an die Trennbarkeitsanalyse für die Trainingsdaten wurde das untersuchte Gebiet mit dem ML und der SVM klassifiziert. Aufgrund des besten Ergebnisses hinsichtlich der spektralen Trennbarkeit, wurde Stack-2 für die Klassifikation verwendet. Die Klassifikation erfolgte auf dem gesamten Datensatz, bestehend aus zwei mosaikierten RapidEye-Szenen (1.000 km²), um eine Abschätzung der Performance² der Klassifikatoren vorzunehmen.

Die OAA und der κ -Koeffizient für die jeweiligen Klassifikationen sind in **Tabelle 4** aufgeführt. Beide Klassifikatoren lieferten sehr hohe Genauigkeiten. 94,83% der landwirtschaftlichen Kulturen wurden mit Hilfe des ML richtig klassifiziert. Ein κ von 0,93 deutet dabei auf eine sehr robuste und hochgenaue Klassifikation hin. Die Gesamtklassifikationsgenauigkeit der SVM betrug 96,13% und war somit noch etwas besser als die des ML. Das ist ein Indiz dafür, dass die SVM bei zunehmender Dimensionalität bessere Ergebnisse liefert. Jedoch muss das Ergebnis im Zusammenhang mit der Performance beurteilt werden (vgl. **Tabelle 4**, t in Std.). Die Klassifikation mit der SVM dauerte rund dreieinhalb Tage und bedeutete somit im Vergleich zu ML (halber Tag) einen deutlich erhöhten Rechen- und Zeitaufwand.

Tabelle 4: Gesamtgenauigkeiten (OAA und κ) und Dauer (t in Stunden) der *Maximum Likelihood*- (ML) und *Support Vector Machines*- (SVM) Klassifikation.

	Anzahl Klassen	ML			SVM		
		OOA (%)	κ	t (Std.)	OOA (%)	κ	t (Std.)
Stack-2	16	94,83	0,93	14	96,13	0,95	82

Bild 5 zeigt die ML-Klassifikationen des monotemporalen März-Datensatzes und des multitemporalen Stack-2 für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes. Auf monotontemporaler Basis waren für März die besten Klassifikationsergebnisse zu erwarten. Die Gesamtklassifikationsgenauigkeit betrug 81,24% und war damit relativ hoch. Der Kappa-Wert von 0,75 deutete auf ein moderates Ergebnis hin. Auch wenn durch die Klassifikation bereits eine hohe Genauigkeit erzielt werden konnte, führte die Klassifikation des multitemporalen Stacks zu einer zusätzlichen Verbesserung von annähernd 14%. Damit wurden nur noch 5% aller Pixel des Datensatzes fehlerhaft klassifiziert.

² Verwendeter Rechner: Dell Precision T1600, Intel Xeon CPU E31245 @ 3.00GHz 3.00GHz, 16 GB RAM, 64 Bit. Verwendete Software: ENVI 5.1

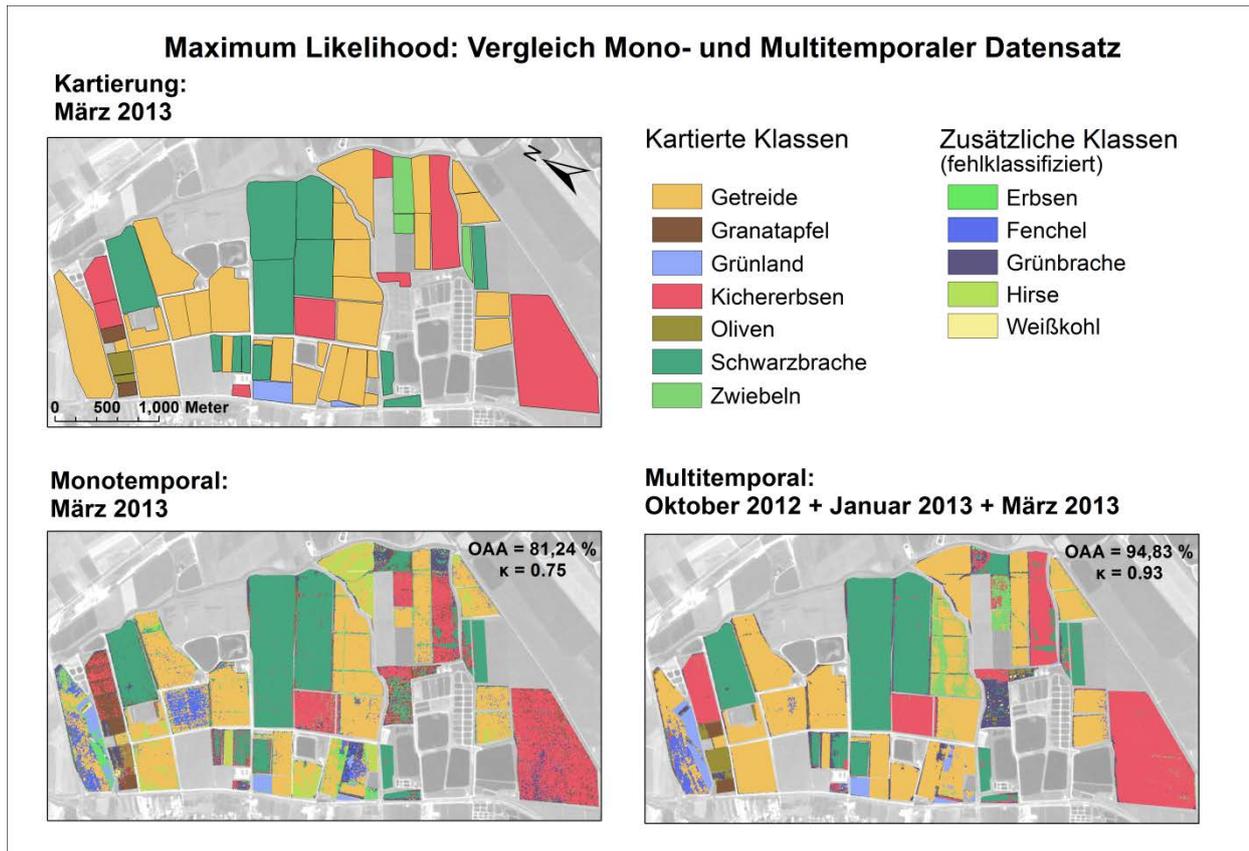


Bild 5: Vergleich zweier Klassifikationsergebnisse eines monotemporalen (März 2013) und eines multitemporalen (Stack-2) Datensatzes mit der Kartierung (März 2013); Ausschnitt aus Untersuchungsgebiet.

LU & WENG (2007) weisen auf oft verrauschte Ergebnisse beim ML hin, was in der monotemporalen Klassifikation (**Bild 5**, links unten) sehr deutlich hervortrat. So waren viele Getreideflächen durchsetzt von fehlerhaft klassifizierten Fenchelpixeln. Die große Kichererbsenfläche im Süden wies einen starken *Salz-Pfeffer-Effekt* auf. Auch hier wurden fehlerhaft Fenchel- und Grünbrachepixel identifiziert.

Die Klassifizierung von Stack-2 zeigte eine erhebliche Verbesserung. Die Flächen waren deutlich differenzierter und der *Salz-Pfeffer-Effekt*, verursacht durch fehlerhaft klassifizierte Pixel, nahm stark ab. Im Zentrum des Ausschnittes konnten mit Zwiebeln bestellte Flächen richtig klassifiziert werden, die im monotemporalen März-Datensatz noch als Getreide und Kichererbsen erkannt wurden. Kleinere Flächen innerhalb von Kichererbsenfeldern wurden auch als Schwarzbrache identifiziert. Kichererbsenfelder zeigen allgemein eine sehr hohe innere Heterogenität. In den Bilddaten sind häufig vegetationsfreie *Flecken* erkennbar, wodurch pixelbasiert keine flächendeckende Identifizierung des Feldes als Kichererbse gewährleistet werden konnte. Auf einigen Flächen war auch zu erkennen, dass die höhere spektrale Dimension der multitemporalen Daten zu Fehlklassifizierungen führen kann. So wurden Zwiebeln innerhalb einer großen Getreidefläche klassifiziert. Eine Erklärung dafür könnten die in dieser Zone vorkommenden größeren Bodenanteile im Pixel sein. Da die in Reihen angebauten Zwiebeln ebenfalls ein

Mischsignal aus Vegetation und Bodenaufweisen, hat der Klassifikator diese Flächen als Zwiebeln identifiziert. Nur leichte Verbesserung im Vergleich zum monotemporalen Datensatz zeigte ein Schlag im äußersten Nordwesten. Hier konnte Getreide nicht von Grünland und Fenchel getrennt werden. Das Getreide war zu diesem Zeitpunkt noch sehr jung und die Ähren besaßen noch keine spektrale Dominanz. Somit glich das grüne vitale Blattwerk stark dem Signal des Grünlandes (u.a. Hornklee).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Studie hat am Beispiel der Winteranbauphase in Nordisrael (Oktober 2012 – März 2013) gezeigt, dass eine multitemporale Analyse von RapidEye-Daten, trotz der vergleichsweise niedrigen spektralen Auflösung, eine sehr gute Differenzierung verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen ermöglicht. Die spektrale Trennbarkeitsanalyse mittels *Jeffries-Matusita Separability* hat sich als vielversprechender Ansatz erwiesen, um einen optimalen multitemporalen Stack zu ermitteln, ohne zahlreiche rechenintensive Klassifikationen und Validierungen durchführen zu müssen. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein Datensatz vor Beginn der Vegetationsphase (Oktober 2012) als Boden- bzw. Brache-Information, ein Datensatz während der Wachstumsphase (Januar 2013) sowie ein Datensatz in der Reifephase (März 2013) nahezu ausreichen um 16 verschiedene landwirtschaftliche Klassen spektral trennen zu können. Beide Klassifikatoren (ML und SVM) haben sehr gute Gesamtklassifikationsgenauigkeiten von über 90% erreicht. Die errechneten Kappa-Koeffizienten liegen für beide Klassifikatoren über 0,9, was die Güte der Klassifikationsergebnisse zusätzlich unterstreicht. Die SVM zeigte zwar leicht höhere Klassifikationsgenauigkeiten im Vergleich zu ML, benötigte jedoch einen deutlich höheren Rechenaufwand.

Eine weitere Verbesserung der Trennbarkeit der einzelnen Klassen sowie die Erhöhung der Klassifikationsgüte wären möglich, wenn zusätzliche Aufnahmen während einer Anbauphase zur Verfügung stehen würden. Im Jahresverlauf weist die Region Nordisrael einen vergleichsweise niedrigen Wolkenbedeckungsgrad auf, was für Untersuchungen basierend auf optischer Fernerkundung ideal ist. Die RapidEye-Sensoren haben durch ihre sehr günstige Orbitlage zudem ein hohes Potential für eine kontinuierliche und zeitlich hochfrequente Abdeckung. Somit wäre es technisch möglich und ein deutlicher Informationsgewinn, die in dieser Arbeit betrachtete landwirtschaftliche Anbauperiode jeden Monat einmal oder sogar 14-tägig aufzunehmen. Eine Aufnahme vom Februar 2013 hätte zusätzlich wichtige phänologische Informationen liefern können, um die Trennbarkeit der Klassen zu verbessern. Beispielsweise kommt besonders der Entwicklung verschiedener Hackfrüchte in diesem Monat eine zentrale Rolle zu. Auch die Monate November und Dezember, die den Beginn des Wachstums landwirtschaftlicher Kulturen in dieser Anbauphase markieren, wären für die Trennung und Klassifikation hilfreich gewesen. So könnte ein Test auf Trennbarkeit verschiedener Getreidesorten (z.B. Roggen, Gerste oder Hafer) näher in Betracht gezogen werden. Ein weiterer inte-

ressanter Aspekt bezüglich der monatlichen Datenaufzeichnung, bestünde in der Identifikation optimaler Aufnahmezeitpunkte sowie der insgesamt benötigten Anzahl an Aufnahmen. Zukünftige Satellitenbildakquise könnte dadurch zeitlich präziser erfolgen und die gesamte Prozedur könnte weiter operationalisiert werden.

Danksagung

Die Arbeiten zu diesem Beitrag sind im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes „Inference of Aerosol and Land Use Interactions from Remote Sensing Data“ (AerosolLand) entstanden. AerosolLand wird als niedersächsisch-israelisches Forschungsvorhaben durch das Bundesland Niedersachsen, Hannover, Deutschland (Fördernummer: 11-76251-99-20/11) finanziert. Die Autoren bedanken sich beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Bereitstellung der RapidEye-Daten aus dem RapidEye Science Archive (RESA Projektantrag 597). Besonderer Dank gilt Thomas Krauß und Peter Fischer vom DLR für die Durchführung der Atmosphärenkorrektur und des radiometrischen Abgleichs der RapidEye-Daten mithilfe der Software CATENA.

Literaturverzeichnis

- ARAÚJO G.K.D., ROCHA J.V., LAMPARELLI R.A.C., ROCHA A.M. (2011):** Mapping of summer crops in the State of Paraná, Brazil, through the 10-day spot vegetation NDVI composites. *Engenharia Agrícola*, 2(4):760–770
- ASKNE J.I.H., FRANSSON J.E., SANTORO M., SOJA M.J., ULANDER L.M. (2013):** Model-Based Biomass Estimation of a Hemi-Boreal Forest from Multitemporal TanDEM-X Acquisitions. *Remote Sensing*, 5(11):5574–5597
- CONGALTON R.G. (1991):** A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1):35 – 46
- CONGALTON R.G., GREEN K. (2008):** Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, Second Edition (Mapping Science). CRC Press
- DEMIR B., BOVOLO F., BRUZZONE L. (2013):** Classification of Time Series of Multispectral Images With Limited Training Data. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 22(8):3219–3233
- FOODY G.M. (2002):** Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1):185 – 201
- GOETZ A.F.H. (2009):** Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, Supplement 1(0):S5 – S16. *Imaging Spectroscopy Special Issue*
- GUALTIERI J.A., CROMP R.F. (1998):** Support vector machines for hyperspectral remote sensing classification. In: *Proceedings of the 27th AIPR Workshop: Advances in Computer Assisted Recognition*, S. 221–232
- GUERSCHMAN J.P., PARUELO J.M., BELLA C.D., GIALLORENZI M.C., PACIN F. (2003):** Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17):3381–3402
- IMS (2014):** Israeli Meteorological Survey. <http://www.ims.gov.il>, 01st April 2014

- JONES H.G., VAUGHAN R.A. (2010):** Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. Oxford University Press, USA
- KAILATH T. (1967):** The Divergence and Bhattacharyya Distance Measures in Signal Selection. Communication Technology, IEEE Transactions on, 15(1):52–60
- KHAN G.A., KHAN S.A., ZAFAR N.A., AHMAD F., ISLAM S. (2012):** A Review of different Approaches of Land Cover Mapping. Life Sciences Journal, 9(4):1023–1032
- LU D., WENG Q. (2007):** A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. International Journal of Remote Sensing, 28(5):823–870
- MULLA D.J. (2013):** Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering, 114(4):358 – 371. Special Issue: Sensing Technologies for Sustainable Agriculture
- MURAKAMI T., OGAWA S., ISHITSUKA N., KUMAGAI K., SAITO G. (2001):** Crop discrimination with multitemporal SPOT/HRV data in the Saga Plains, Japan. International Journal of Remote Sensing, 22(7):1335–1348
- MURTHY C.S., RAJU P.V., BADRINATH K.V.S. (2003):** Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks. International Journal of Remote Sensing, 24(23):4871–4890
- OETTER D.R., COHEN W.B., BERTERRETICHE M., MAIERSPERGER T.K., KENNEDY R.E. (2001):** Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. Remote Sensing of Environment, 76(2):139 – 155
- PANIGRAHY S., CHAKRABORTY M. (1998):** An integrated approach for potato crop intensification using temporal remote sensing data. {ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53(1):54 – 60
- RICHARDS J.A. (2012):** Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer
- SCHAEPMAN M.E., USTIN S.L., PLAZA A.J., PAINTER T.H., VERRELST J., LIANG S. (2009):** Earth system science related imaging spectroscopy—An assessment. Remote Sensing of Environment, 113, Supplement 1(0):S123 – S137. Imaging Spectroscopy Special Issue
- SMOLA A.J., SCHÖLKOPF B. (2004):** A Tutorial on Support Vector Regression. Statistics and Computing, S. 199–222
- STUCKENS J., COPPIN P., BAUER M. (2000):** Integrating Contextual Information with per-Pixel Classification for Improved Land Cover Classification. Remote Sensing of Environment, 71(3):282 – 296
- SWAIN P.H. (1972):** Pattern Recognition: A Basis for Remote Sensing Data Analysis. Technischer Bericht 111572, Perdue University - LARS TECHNICAL REPORTS
- THENKABAIL P.S., LYON J.G., HUETE A., HRSG. (2011):** Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. CRC Press
- VAPNIK V. (1995):** The Nature of Statistical Learning Theory. Information Science and Statistics. Springer
- VICENTE-GUIJALBA F., MARTINEZ-MARIN T., LOPEZ-SANCHEZ J. (2014):** Crop Phenology Estimation Using a Multitemporal Model and a Kalman Filtering Strategy. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 11(6):1081–1085
- WACKER A.G. (1971):** The Minimum Distance Approach to Classification. Doktorarbeit, Purdue University, West Lafayette
- WACKER A.G., LANDGREBE D.A. (1972):** Minimum Distance Classification in Remote Sensing. LARS Technical Reports 25, Purdue University

WEICHEL T. H., ROSSO P., MARX A., REIGBER S., DOUGLASS K., HEYNEN M. (2013): The RapidEye Red Edge Band. Technischer Bericht, BlackBridge

WONDRADE N., OSTEIN B.D., TVEITE H. (2014): GIS based mapping of land cover changes utilizing multi-temporal remotely sensed image data in Lake Hawassa Watershed, Ethiopia. Environmental Monitoring and Assessment, 186(3):1765–1780

Comparison of manual and automatic barcode detection in horticultural production systems

Felix Eyahanyo¹, Thomas Rath²

¹ Leibniz Universität Hannover, Institute of Horticultural Production Systems, Biosystems Engineering Section, Herrenhäuser Str. 2, 30419, Hannover, Germany

² University of Applied Sciences Osnabrück, Biosystems Engineering Laboratory, Oldenburger Landstr. 24, 49090 Osnabrück

Email: eyahanyo@bgt.uni-hannover.de, t.rath@hs-osnabrueck.de

Automation aims at increasing the efficiency of production of any operation by increasing productivity and profitability. For this barcode systems have been used in various fields mainly for security, tracking and process control. Recent improvements in barcode technology offer tremendous opportunities also in horticultural production systems. Using stationary laser barcode readers for automation in horticultural production often failed due to the close proximity between the barcode and the reader and factors such as speed, angle of orientation of the barcode, damage to the barcode and dirt on the barcode. Therefore hand barcode readers are still being used in the nurseries making work laborious, time consuming and thereby leading to reduction in productivity. Because of these problems a project within the WeGa network (www.wega-online.org) was realized to investigate and optimize a stationary camera system together with barcode detection algorithms for better automation in a horticultural production system. The proposed system is expected to be efficient in decoding clean, faded, dirty, extremely dirty alpha-numeric barcodes.

Images of different horticultural barcode labels were taken within a camera station placed on horticultural transport lines at a greenhouse at the university in Hannover and in a company under production reality. To avoid natural light the scenes were covered with black cloth and illuminated with artificial light. The images were analyzed with specific algorithms developed with the software tool Halcon (MvTec). The system was tested under different situations with clean and artificially soiled labels. Barcodes (Code 128) were placed in different orientations using angles 60°, 75° and 90° and test speeds of 0.03, 0.07, 0.11, 0.17, 0.21, 0.26, 0.30 m/s. The experiment was finally tested in a flower production company (Brandkamp GmbH) to validate the efficiency of automatic barcode detection in the horticultural production.

A 100% detection were reached in the company with a production speed of 0.11 m/s for clean and slightly dirty barcodes. However, when the barcode was extremely dirtied, there was 90% detection. Increasing the speed and angle of inclination resulted in decreased barcode detection. Overall the results from the company show that the camera system has a future prospect for automation in horticultural production systems with barcodes. It overcomes the problem of using hand held barcode readers.

Keywords: Automation, Horticulture, Barcode, Image processing

Vorstudie zur Erfassung des Sehvermögens bei Geflügel

Erik Wunder¹, Robby Andersson², Daniel Kämmerling², Arno Ruckelshausen¹

¹ Hochschule Osnabrück/ Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik,
Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, Deutschland,
Email: erik.wunder@hs-osnabrueck.de, a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

² Hochschule Osnabrück/ Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur,
Am Krümpel 31, 49090 Osnabrück, Deutschland,
Email: j.kaemmerling@hs-osnabrueck.de, r.andersson@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Lichtbezogene Größen, die im Zusammenhang mit der menschlichen Wahrnehmung stehen, werden in der Regel nicht durch radiometrische Größen wie die Bestrahlungsstärke in W/m^2 angegeben, sondern durch Größen, welche das Wahrnehmungsvermögen des Menschen berücksichtigen, hierzu zählen Lux, Candela und Lumen. Es ergibt sich die Fragestellung in wieweit sich diese photometrischen Größen auf die Wahrnehmung anderer Lebewesen übertragen lassen, da sich das Sehvermögen anderer Lebewesen von der Wahrnehmung des Menschen deutlich unterscheiden kann. Aus diesem Grund wurde eine Vorstudie betrieben, um das Wahrnehmungsvermögen bei Geflügel einschätzen zu können. Bekannt ist, dass sich die Sensitivität bei Geflügel über den für den Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich hinaus, bis in den nahen Infrarotbereich und in den ultravioletten Wellenlängenbereich, erstreckt, was z.B. in der geflügelbezogenen Größe „Gallilux“ berücksichtigt worden ist. Aufgrund dieser Unterschiede wurden technische Untersuchungen sowohl mit einer UV-empfindlichen Kamera, als auch mit NIR-Hyperspectral-Imaging gemacht. Zusätzlich wurden verschiedene dem Menschen entfremdete (unzugängliche) Wahrnehmungsformen mittels einer Multispektral-Kamera simuliert. Die Ergebnisse dieser Vorstudie werden vorgestellt.

Deskriptoren: Vorstudie, Wahrnehmung von Geflügel, Gallilux, UV-Kamera, NIR-Hyperspectral-Imaging, Multispektral-Kamera, Simulation

Abstract: Values referred to light in the context of human faculty of sight are normally not represented in radiometric values like irradiance in $Watts/m^2$ but in values incorporating human faculty of sight like lux, candela and lumen. It arises the question whether these photopic values could be transferred to the perception of other creatures because the perception of other creatures could be very different from the perception of humans. For that reason a pre-study was arranged to examine the perception of poultry. It is already known that the sensitivity of poultry goes beyond the sensitivity of humans into the range from near infrared wavelength to the ultraviolet wavelength range which is already used for defining a poultry related value called "Gallilux". Because of these differences technical investigations were made using an ultraviolet-sensing camera and near infrared hyperspectral imaging technology. In addition to that different estranged

(inaccessible) perceptual modes were simulated with a multispectral camera. The results of this study are presented.

Keywords: *pre-study, perception of poultry, Gallilux, ultraviolet camera, NIR hyperspectral imaging, multispectral camera, simulation*

1 Einleitung

Die Beleuchtung von Geflügelställen unterliegt gesetzlichen Regelungen, sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene. In diesen Regelungen werden unter anderem Mindestanforderungen an die Beleuchtungsdauer und die Lichtintensität in Ställen vorgeschrieben. So ist in Artikel 14.1 der "Empfehlung in Bezug auf Haushühner der Art Gallus Gallus" vom 28. Nov. 1995 für folgendes formuliert.

„In allen Gebäuden muss ausreichend Licht vorhanden sein, damit sich die Tiere gegenseitig sehen und deutlich gesehen werden können, ihre Umgebung sehen und ein normales Aktivitätsniveau zeigen können. Daher ist eine Mindestbeleuchtung von 20 Lux, auf Augenhöhe der Hühner, gemessen in drei Ebenen, die jeweils im rechten Winkel zueinander stehen, empfehlenswert. Soweit möglich, muss eine natürliche Lichtquelle vorhanden sein. In diesem Fall sollen Fenster so angeordnet werden, dass das Licht gleichmäßig in den Stall fällt.“

In der „TIERSCHUTZ-NUTZTIERHALTUNGSVERORDNUNG“ (2009) ist in §4 (1) Nr. 9 folgendes zur Beleuchtung in Geflügelställen ausgeführt: *„ ... die tägliche Beleuchtungsintensität und Beleuchtungsdauer bei Tieren, die in Ställen untergebracht sind, für die Deckung der ihrer Art entsprechenden Bedürfnisse ausreichen [...] wobei bei Geflügel das künstliche Licht flackerfrei entsprechend dem tierartspezifischen Wahrnehmungsvermögen sein muss“.*

Die Forderungen im Stall künstliches Licht entsprechend der spezifischen Wahrnehmung bei Geflügel einzurichten wirft die Frage auf, wie die Wahrnehmung bei Geflügel stattfindet. Es ist üblich lichtbezogene Größen nicht in radiometrischen Größen wie beispielsweise der Bestrahlungsstärke anzugeben, sondern in Größen, die bereits die Empfindlichkeit des menschlichen Sehvermögens mit einbeziehen, wie es bei der Beleuchtungsstärke der Fall ist. Konsequenterweise müssten bei Unterschieden im artspezifischen Wahrnehmungsvermögen die entsprechenden Kenngrößen auf einzelne Arten bezogen werden und die Übertragung des menschlichen Sehvermögens auf Nicht-Menschen würde zu systematischen Fehlern führen.

Die Wahrnehmung wird von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst, zu nennen sind hier z.B. die Rezeptorendichte und Sehschärfe, die spektrale Empfindlichkeit, die Kontrastempfindlichkeit, die Empfindlichkeit für Farbunterschiede, die Hell-Dunkel-Adaptation, der Dynamikbereich oder aber auch die wahrnehmbare Bildrate, die entscheidend ist für die Flackerempfindlichkeit. Bei der Betrachtung des Wahrnehmungsvermögens des Geflügels müssen alle relevanten Faktoren berücksichtigt werden, denn

das außer Acht lassen bereits eines Faktors kann zu einer massiven Fehlinterpretation führen.

Seit vielen Jahren werden Untersuchungen zur Wahrnehmung bei Geflügel durchgeführt. Arbeiten zur spektralen Empfindlichkeit bei Geflügel gibt es beispielsweise von WORTEL *et al.* (1987), NUBOER *et al.* (1992), PRESCOTT & WATHES (1999), LEWIS & MORRIS (2000) oder auch BARBER *et al.* (2006), in denen Versuche unternommen wurden, die Empfindlichkeit für photopisches Sehen bei Geflügel für Licht bestimmter Wellenlängen festzustellen. **Bild 1** zeigt die ermittelte relative Empfindlichkeitskurve von Hausgeflügel (dicke Linie) gegenüber der in der CIE-Norm festgehaltenen relativen Empfindlichkeit des Menschen (dünne Linie). Deutlich erkennbar ist dabei, dass Hühner deutlich empfindlicher für Licht der Wellenlängen unterhalb von 500 nm und oberhalb von 600 nm sind als der Mensch. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass Hühner vier Zapfenarten für das Farbsehen besitzen (WORTEL *et al.* 1987), der Mensch verfügt hingegen nur über drei Zapfen. Diese Empfindlichkeitskurve von Hausgeflügel wurde bereits dazu genutzt eine geflügelbezogene Größe für die Lichtintensität mit der Bezeichnung "Gallilux" zu definieren, jedoch gibt diese Größe keinen Aufschluss über die absolut wahrgenommene Lichtintensität, da die maximale spektrale Empfindlichkeit für photopisches Sehen bei Geflügel nicht bekannt ist und hier statt dessen der auf den Menschen bezogene Wert Verwendung findet (LEWIS & MORRIS 2006). Weitere Arbeiten zur Flackerempfindlichkeit gibt es z.B. von JAVIS *et al.* (2002). Es ist somit seit längerem bekannt, dass es Unterschiede im Wahrnehmungsvermögen bei Mensch und Geflügel gibt. Es stellt sich jedoch auch hier die Frage, wie ausschlaggebend diese Unterschiede sind. Aus diesem Grund sind Untersuchungen in den Wellenlängenbereichen abseits der menschlichen Wahrnehmung durchgeführt worden und es wurden mögliche Auswirkungen einer dem Menschen artfremden Wahrnehmung simuliert.

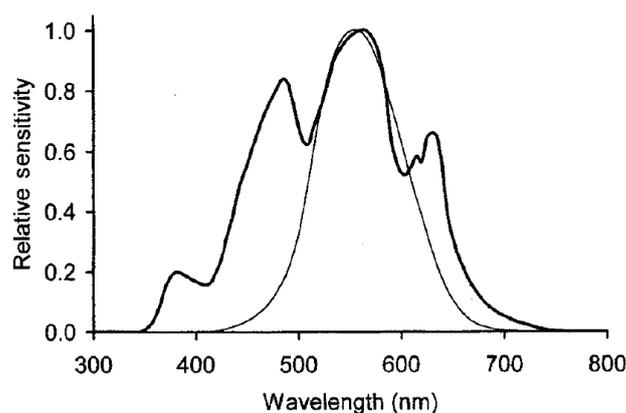


Bild 1: Gegenüberstellung der relativen spektralen Sensitivität von Hausgeflügel (dicke Linie) und der relativen spektralen Empfindlichkeit des Menschen (CIE 1983) (dünne Linie)
[LEWIS & MORRIS 2000]

2 Material und Methoden

Die durchgeführten Versuche hatten zum Ziel Objekte explizit in Wellenlängenbereichen zu betrachten, die der Mensch nicht in der Lage ist zu sehen.

Messobjekte:

Dank der Fa. LTZ, Cuxhaven standen für die Messungen vier Tierpräparate zur Verfügung. Eine LB-Elterntierhenne, eine LSL-Henne, eine LB-Henne sowie ein Brahma-Hahn. Die Tiere wurden vom Tierpräparator Michael Dittert präpariert (siehe **Bild 2**).



Bild 2: Tierpräparate für Reflektionsmessungen

Neben den Tierpräparaten wurden zusätzlich Blumen (Primeln und Veilchen) für Messungen verwendet wie auch verschiedene Futtersorten aus der Geflügelhaltung (Vorlegfutter, Junghennenaufzuchtfutter, Legemehl und Endmastfutter) um zu prüfen, inwiefern die Fähigkeit von Geflügel einen größeren Wellenlängenbereich zu erfassen als der Mensch, für die Nahrungssuche und die Umgebungswahrnehmung von Bedeutung sein können.

Hyperspectral Imaging System

Mittels Hyperspectral Imaging ist es möglich Objekte sehr differenziert bei sehr vielen Wellenlängen zu betrachten. Aufgrund der spektralen Unterschiede der Wahrnehmung von Mensch und Geflügel, wurden Messungen mit Hyperspectral Imaging an Hühnerpräparaten durchgeführt, die zeigen sollten, ob in den Bildern der betrachteten Wellenlängen Auffälligkeiten auftreten. Betrachtet wurde sowohl der sichtbare Wellenlängenbereich, als auch der NIR-Bereich. Auch wenn letzterer keinen Einfluss auf die Wahrnehmung bei Geflügel hat, so ist dieser Bereich dennoch interessant für generelle Untersuchungen der Proben auf Anomalien. Für Messungen im nahen Infrarotbereich wurde das Sensorsystem Helios Core NIR der Firma EVK DI Kerschhagl GmbH eingesetzt. Das System ist mit einem NIR Spektrographen der Firma Specim ausgestattet mit einer Eingangsspaltbreite von 100 μm . Der eingesetzte Spektrograph weitet das

einfallende Licht im Wellenlängenbereich von 970 nm bis 1690 nm in seine Spektralbestandteile auf. Für den sichtbaren Wellenlängenbereich wurde ebenfalls ein Hyperspectral Imaging System eingesetzt. Verwendet wurde ein Inspector V10 mit 50 µm Eingangsspaltbreite von Specim in Verbindung mit einer Monochrom-Kamera des Typs MV1-D1312 der Photonfocus AG. Der Spektrograph weitet das Licht im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 1000 nm in seine Spektralbestandteile auf.

Integriert sind beide Systeme in eine Messvorrichtung mit automatisiertem elektrisch positionierbarem Tisch, auf dem Messobjekte platziert werden können. Der Helios Core wie auch der Inspector V10 sind senkrecht über dem Tisch angeordnet und scannen bei Bewegung des Tisches das zu vermessende Objekt zeilenweise ein. Um von den Messobjekten kontinuierliche Spektren zu erhalten wird Beleuchtung benötigt, die Strahlung im gesamten zu erfassenden Spektrum liefert. Daher wurden vier Halogenscheinwerfer mit je 65 Watt links und rechts neben dem Inspector angebracht, um das Messobjekt möglichst gleichmäßig auszuleuchten. Der Objektisch wird über eine Linearführung mit Nanotec Schrittmotoren bewegt.

Mit dieser Messvorrichtung wurden die vier Tierpräparate im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich aufgenommen, wodurch für jedes Huhn ein dreidimensionaler Datenwürfel entstand, welcher ein Bild des Huhns für jede gemessene Wellenlänge enthält. Diese Bilder wurden anschließend einer Sichtprüfung unterzogen.

Empfindlichkeit für ultraviolette Strahlung

Bild 1 zeigt, dass Geflügel im Gegensatz zum Menschen im Lichtbereich von 350 nm bis 400 nm wahrnehmen kann, Daher wurden Aufnahmen von genannten Testobjekten in diesem Wellenlängenbereich gemacht, um zu testen, ob die Objekte Auffälligkeiten zeigen, die für die Wahrnehmung bei Geflügel von Bedeutung sein könnte. Für die Messungen wurde eine Osprey OS4MPc-CL Kamera der Firma Raptor Photonics verwendet, eine Monochrom-Kamera mit 4,2 Megapixeln und einem gekühlten Scientific CMOS Sensor, die mit einem Bandpassfilter 377/50 BrightLine® von Semrock kombiniert wurde um nur den Wellenlängenbereich von 350 nm bis 400 nm bei den Aufnahmen zu berücksichtigen. Da Objektive UV-Strahlung häufig nur schlecht transmittieren, wurde für diese Messungen das LM16HC Objektiv der Firma Kowa Optimed Deutschland verwendet.

Für die Datenerfassung ist ein Computer mit CameraLink-Framegrabber erforderlich. Verwendet wurde daher ein Notebook mit einer EPIX CameraLink ExpressCard und dem Softwarepaket EPIX XCAP. Zur aktiven Beleuchtung der Messobjekte wurde ein umgebautes Nagelaushärtungsgerät des Typs Dream Nails Professionell verwendet, welches mit vier 9W UV-Leuchtstoffröhren ausgestattet ist.

Für die Messungen wurden alle vier Tierpräparate wie auch die Testpflanzen nacheinander im Abstand von etwa 50 cm von der UV-Lampe angestrahlt, und mit der UV-Kamera aus verschiedenen Richtungen abgelichtet.

Multispektralkamera

Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie sich die Fähigkeit verschiedene Wellenlängenbereiche wahrnehmen zu können auf die gesamte Wahrnehmung auswirken kann, wurden Versuche unternommen verschiedene Wahrnehmungsformen anhand einer Testszene zu simulieren. Für diese Simulation wurde die Multispektralkamera Condor3 PCH-285-GE von Quest Innovations verwendet. Diese Kamera besitzt drei CCD Chips mit je 1,4 Megapixeln (Auflösung 1360x1024), einen Bayer-Chip für das sichtbare Licht im Wellenlängenbereich von 400 nm bis 700 nm und zwei Chips für nahinfrarote Strahlung der Wellenlängen 700 nm bis 830 nm und 830 nm bis 1000 nm. Für die Datenerfassung wird die Architector Vision Suite von Quest Innovations genutzt. Diese Software ermöglicht es die Farbkanäle der Bilddarstellung (Rot, Grün, Blau) den Kanälen der Bildsensoren (Rot, Grün, Blau, NIR1, NIR2) frei zuzuordnen. Somit ist es beispielsweise möglich den Blaukanal in der Darstellung mit den Informationen eines NIR-Bildsensors zu versorgen und somit ganz andere Wahrnehmungsformen im für Menschen sichtbaren Farbraum abzubilden Dies wurde für verschiedene Kombinationen (**Tabelle 1**) durchgeführt. Abgebildet wurde eine Szene mit verschiedenfarbigen Objekten aus verschiedenen Materialien. Es handelt sich um eine blaue Packung Taschentücher, einen grünen Duplostein, eine rote Kugel sowie ein Blatt eines Ficus Benjamins. Der Hintergrund ist schwarz und besteht aus Nylon, der Objektisch besteht aus schwarz lackiertem Metall.

Tabelle 1: Varianten der Farbkanalkombination zur Simulation artfremder Wahrnehmung

	Rot-Kanal	Grün-Kanal	Blau-Kanal
Variante 1	Rot	Grün	Blau
Variante 2	Grün	Blau	Rot
Variante 3	IR1	-	Blau
Variante 4	Rot	IR2	Blau

3 Ergebnisse und Diskussion

Hyperspectral Imaging

Die Aufnahmen der Tierpräparate mittels Hyperspectral Imaging haben zur Veranschaulichung des Wahrnehmungsvermögens bei Geflügel beigetragen. Detaillierte Untersuchungen müssen folgen. Die Aufnahmen vermitteln einen ersten Eindruck bezüglich der vogelspezifischen Fähigkeit nah-infrarote Strahlung zu erfassen (**Bild 3**). Anhand der Bilder ist zu erkennen, dass das weiße Federkleid die infrarote Strahlung deutlich reflektiert. Die besonders roten Stellen mit der höchsten Reflektion sind Bereiche in denen die Federn nahezu senkrecht zum auftreffenden Licht stehen und fast die gesamte reflektierte Strahlung in die Optik zurückgeworfen wird. Die Aufnahme des braunen Huhns zeigt, dass die helleren Federn die Strahlung besser reflektieren als die braunen Federn. Dies trifft sowohl für das RGB-Bild, als auch auf das Bild bei einer Wellenlänge von 749 nm zu. Der helle Bereich, der sich horizontal durch das Bild zieht, resultiert aus einer ungleichmäßigen Lichtverteilung beim Scannen des Huhns, sodass die roten Stellen im Bild nicht auf Auffälligkeiten zurückzuführen sind, sondern lediglich die erhöhte Reflektion der helleren Federn zeigen.

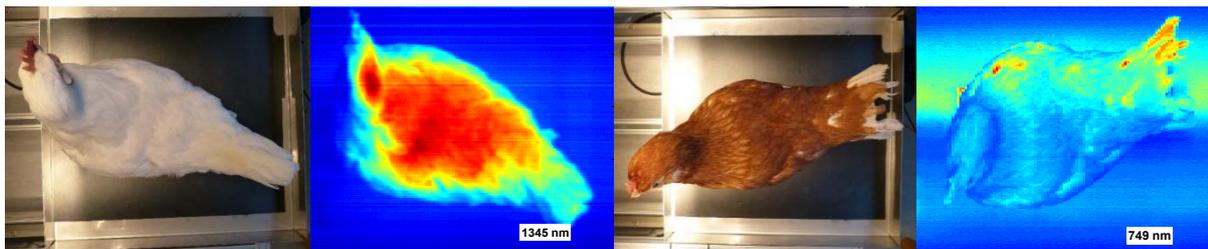


Bild 3: Gegenüberstellung von RGB- und NIR-Bild eines weißen Haushuhns bei 1345 nm (links) und RGB- und VIS-Bild eines braunen Haushuhns bei 749 nm (rechts)

UV-Kamera

Die Erfassung von Bildmaterial aus dem UV-Bereich hat besonders bei den pflanzlichen Testobjekten zu interessanten Ergebnissen geführt. **Bild 4** (links) zeigt den Vergleich des RGB-Bildes einer Primel mit einer UV-Aufnahme. Im RGB Farbraum sehen die Blüten zweifarbig aus und sie wirken durch die gelbe Tönung hell. Die Aufnahme im UV-Bereich zeigt ein deutlich anderes Bild. Hier wird fast die gesamte UV-Strahlung absorbiert, sodass die Blüten fast schwarz abgebildet werden. Die Blätter hingegen reflektieren die UV-Strahlung deutlich besser. Ein etwas anderes Bild zeigt sich bei den Aufnahmen der Tierpräparate, hier beispielhaft demonstriert anhand von **Bild 5**. Im Gefieder der Tiere sind deutliche Kontraste zu erkennen, besonders beim braunen Haushuhn sind die wenigen weißen Federn im UV-Bereich deutlich hervorgehoben, während das braune Gefieder auch im UV-Bereich geringe Reflektion zeigt. Beim weißen Haushuhn reflektiert das Gefieder im UV-Bereich stark, markante Reflektionsmuster sind nicht erkennbar. Somit lassen sich hier zunächst keine direkten Rückschlüsse darauf ziehen, in wie fern dieser Wellenlängenbereich relevant ist für eine korrekte Wahrnehmung von

Artgenossen, wie es in den Richtlinien gefordert wird. Bei der UV-Aufnahme des Futters hingegen fällt auf, dass gewisse Partikel im UV-Bereich besonders stark reflektieren und somit aus dem restlichen Futter stark herausstechen (**Bild 4** rechts). In diesem Fall handelt es sich um das Kernmaterial von zerkleinerten Maiskörnern, welches besonders deutlich hervorgehoben wird. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Fähigkeit von Geflügel UV-Strahlung wahrzunehmen zumindest bei der Futtersuche von erheblicher Bedeutung ist.



Bild 4: Vergleich von RGB- und UV-Aufnahme einer gelben Primel (links) und einer Probe von Junghennenaufzuchtfutter (rechts)



Bild 5: Vergleich von RGB-Bild und UV-Bild eines braunen und eines weißen Haushuhns

Multispektral Kamera

Durch Aufnahmen mit der Multispektralkamera Condor 3 von Quest, ist es möglich verschiedene Wahrnehmungsformen zu simulieren. Die verschiedenen Kombinationen der Farbkanäle, die in **Bild 6** dargestellt sind, finden sich in **Tabelle 1** in der entsprechenden Reihenfolge. Links oben ist das normale RGB-Bild zu erkennen, welches die Farben der Objekte so wiedergibt, wie der Mensch sie üblicherweise wahrnimmt. Werden die Kanäle rot, grün und blau untereinander vertauscht (oben rechts), ergibt sich eine ganz andere Darstellung. Interessant ist vor allem auch der Einfluss nah-infraroter Strahlung. Beispielsweise reflektiert Chlorophyll NIR-Strahlung sehr stark, wodurch das Blatt in den beiden unteren Abbildungen deutlich hervortritt. Auch ist erkennbar, dass der Hintergrund nicht mehr Schwarz, sondern farbig ist. Dies liegt daran, dass das Hintergrundmaterial aus Nylon besteht, das IR-Strahlung stark reflektiert. Diese Untersuchung vermittelt einen Eindruck verschiedener Wahrnehmungsformen, jedoch sind die Auswirkungen verschiedener Wellenlängenbereiche auf die Gesamtwahrnehmung schwer abschätzbar, da der Mensch nur in der Lage ist entsprechend seiner Empfind-

lichkeit Wellenlängen wahrzunehmen und eine Transformation anderer Wellenlängen in den für Menschen sichtbaren Bereich nur bedingt zielführend ist um die Wahrnehmung anderer Lebewesen nachzuvollziehen.

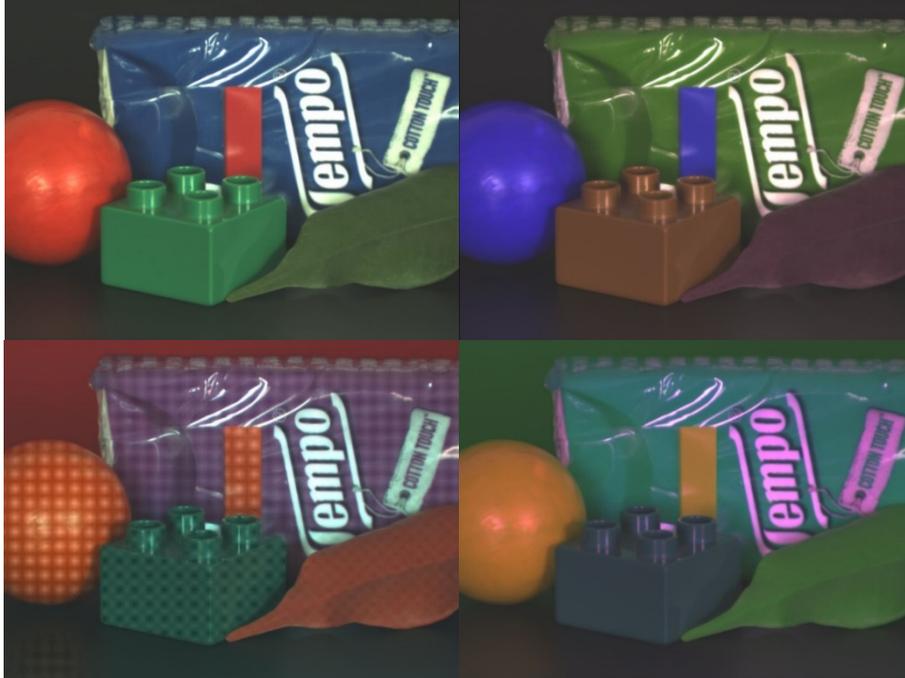


Bild 6: Verschiedene Ansichten ein und derselben Szene durch Kombination verschiedener Wellenlängenbereiche in den RGB-Farbraum vgl. **Tabelle 1**

4 Zusammenfassung

Die Wahrnehmung wird durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst. Es wurde gezeigt, dass verschiedene Objekte im UV-Bereich, oder auch im NIR-Bereich ganz andere Merkmale aufweisen können, die der Mensch nicht in der Lage ist wahrzunehmen. Jedoch lässt sich aus den durchgeführten Messungen nicht auf das Wahrnehmungsvermögen bei Geflügel oder anderen Lebewesen schließen. Es gibt bereits den Ansatz photopische Lichtgrößen einzuführen, welche die spektrale Empfindlichkeit von Geflügel berücksichtigen, jedoch ergeben sich hier Schwierigkeiten, denn zum einen basieren die Daten der spektralen Empfindlichkeit von Geflügel überwiegend aus psychophysikalischen Versuchen, bei denen ein Lichtreiz ein Verhalten beim Tier auslöst, weshalb die Zuverlässigkeit der Daten angezweifelt werden könnte, zum anderen fehlt ein Wert für die absolute Empfindlichkeit, sodass über die tatsächlich empfundene Helligkeit eines Leuchtmittels noch keine Aussage getroffen werden kann. Des Weiteren ist auch die Grenze zwischen photopischem und skotopischem Sehen nicht bekannt, sodass keine Aussage dazu getroffen werden kann, ab welcher Intensität die ermittelte Empfindlichkeitskurve ihre Gültigkeit besitzt. Es besteht somit in diesem Feld erheblicher Forschungsbedarf, um das Wahrnehmungsvermögen bei Geflügel zu entschlüsseln. Angesichts dieser fehlenden Informationen fehlt im Grunde jegliches Fundament um klare Richtlinien für die Beleuchtung in Geflügelställen zu formulieren. Die menschenbezoge-

ne Größe Lux ist aufgrund der Unterschiede zwischen menschlichem Sehen und dem Wahrnehmungsvermögen bei Geflügel nicht geeignet um die Helligkeit in Geflügelställen aus Sicht des Vogels zu beurteilen. Es ist notwendig eine auf den Vogel bezogene Kenngröße zu entwickeln.

Literaturverzeichnis

- BARBER C.L., PRESCOTT N.B., JARVIS J.R., LE SUEUR C., PERRY G.C., WATHES C.M. (2006):** Comparative study of the photopic spectral sensitivity of domestic ducks (*Anas platyrhynchos domesticus*), turkeys (*Meleagris gallopavo gallopavo*) and humans. *British Poultry Science* 47 (3), S. 365–374
- EU-EMPFEHLUNG (1995):** Empfehlung in Bezug auf Haushühner der Art *Gallus Gallus*. Online verfügbar unter http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Tier/Tierschutz/GutachtenLeitlinien/EU-HaltungHaushuehner.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 28.03.2014
- JAVIS J.R., TAYLOR N.R., PRESCOTT N.B., MEEKS I., WATHES C.M. (2002):** Mesuring and modeling the photopic flicker sensitivity of the chicken (*Gallus g. domesticus*). *Vision Research* 42: S. 99-106
- LEWIS P.D., MORRIS T.R. (2000):** Poultry and coloured light. *World's Poultry Science Journal* 56 (3), S. 189–207
- LEWIS P.D., MORRIS T.R. (2006):** Poultry lighting. The theory and practice. Andover: Northcot
- NUBOER J.F.W., COEMANS M.A.J.M., Vos J.J. (1992):** Artificial lighting in poultry houses: Are photometric units appropriate for describing illumination intensities? *British Poultry Science* 33 (1), S. 135–140
- PRESCOTT N.B., WATHES C.M. (1999):** Spectral sensitivity of the domestic fowl (*Gallus g. domesticus*). *British Poultry Science* 40 (3), S. 332–339
- TIERSCHNUTZTV (2009):** Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/tierschnutztv/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 28.03.2014
- WORTEL J.F., RUGENBRINK H., NUBOER J.F.W. (1987):** The photopic spectral sensitivity of the dorsal and ventral retinae of the chicken. *Journal of Comparative Physiology*, 160: 151–154

Optimierung der Bildauswertung von Farbbildern aus Minirhizotronen zur Wurzelbeobachtung

Rüdiger Harms¹, Hans-Peter Schäfer², Gerhard Kast³, Maik Veste⁴

¹ PhysComp, Sperlingsgasse 17A, 38126 Braunschweig

² Schäfer GmbH - Industrielle Meß- und Videotechnik, Trautenstrasse 6, 38114 Braunschweig

³ UP Umweltanalytische Produkte GmbH, Taubenstrasse 4, 03046 Cottbus

⁴ CEBra - Centrum für Energietechnologie Brandenburg e.V., Friedlieb-Runge-Strasse 3, 03046 Cottbus

Email: maik.veste@me.com

Zusammenfassung: Die Minirhizotrontechnik ist ein geeignetes Werkzeug, um das Wachstum und die Lebensdauer von Feinwurzeln und Veränderungen der Wurzelynamik zu beobachten. Wir entwickelten ein automatisches Minirhizotronsystm mit einer vollautomatischen Bildaufnahme entlang der Röhre. Eine Bildoptimierung wurde durch eine Verbesserung der Bildauswertesoftware erreicht, die die Erstellung eines Gesamtbildes für die Auswertung ermöglicht.

Deskriptoren: Minirhizotron, Bildverarbeitung, Objekterkennung, Wurzeln

Abstract: *The minirhizotron technique is a suitable tool to observe fine root growth and longevity and changes of root dynamics. We developed a novel automatic minirhizotron system with a fully automatic image acquisition along the tubes. An image enhancement has been achieved by improving the image processing software, that allows to create an overall image for further evaluation.*

Keywords: *minirhizotron, imaging, object detection, roots*

1 Einleitung

Nicht-destruktive Untersuchungen des Wurzelsystems haben eine große Bedeutung für Agrar- und Forstwissenschaften und ökologische Studien. Bisherige direkte Untersuchungen zur Struktur und Dynamik des Wurzelsystems sind allerdings im Boden erschwert. Die Minirhizotron-Technik erlaubt nicht-destruktive Beobachtungen der Feinwurzelproduktion, Sterblichkeit und Umsatzes über einen längeren Zeitraum (MAJDI *et al.* 2005, SMIT *et al.* 2000, VESTE 2012). Bei dieser Methode werden Glas- oder Plexiglasröhren in der Nachbarschaft der Pflanzen in den Boden eingelassen. So können Minirhizotrone qualitative Informationen über die Wurzelfarbe und auch über die Ausbildung der Mykorrhiza liefern. Für die Wurzelnahmen wurde ein neues automatisches Minirhizotronsystm entwickelt (VESTE *et al.* 2013), das auf einer Farb-Kamera mit einem Durchmesser von 28 mm basiert. Die Kamera wird mit Hilfe von Schrittmotoren, die von Beckhoff-Steuerungstechnik über die Software angesprochen werden, in der Röhre positioniert. Das Abtasten der Röhre und die Bildaufnahme erfolgt in freiwählbaren Tiefen-

schritten und Winkeln. Die Baulänge der Führung bedingt die maximale Beobachtungstiefe. Bisher wurde ein System mit einer Baulänge von 160 cm realisiert (**Bild 1**).



Bild 1: Automatisches Minirhizotronsystem mit automatischer Führung zur Untersuchung des Wurzelwachstums (A), Positionierung der Fingerkamera in den Minirhizotronröhren (B)

Für diese automatische Steuerung der Führung der Kamera und die automatische Bilderfassung wurde das Programm „Wurzel“ entwickelt. Für ein- und mehrachsige Bewegungen wird eine PC-gesteuerte Antriebstechnik verwendet, über die die Schrittmotoren gesteuert werden. Für die Positionierung der Kamera sind drei Optionen vorhanden: a) Manuelles Abfahren der Röhre, b) automatische Positionierung der Kamera auf eine genaue Koordinate (Tiefe, Winkel) und c) vollautomatisches Scannen der Röhre in frei definierbaren Tiefenbereichen.

2 Bilderfassung und -verarbeitung

Die Bilderfassung erfolgt mit einer CCD-Fingerkamera (**Bild 1**), die auf einem Sony CCD Sensor basiert. Auf den Leuchtkörper ist ein Spiegel installiert, der einen Blickwinkel von 90° ermöglicht. Die Kamera verwendet ein PAL Signal, das direkt über einen USB-Video-Konverter in ein digitales Bild umgewandelt wird. Die so entstandenen Fotos können als Tiefenebenen-Bilder oder Gesamtbild vom Programm „Wurzel“ als JPG-Dateien exportiert werden.

3 Optimierung der Bildaufnahme

Während der technischen Erprobung der Minirhizotron-Anlage haben sich bei der Bildaufnahme technische Probleme ergeben, die die Qualität der erzeugten Bilder deutlich minderten und die Auswertung erschwerten. Ein grundlegendes Problem bei der Bildfassung sind Reflexionen in den oberen Ecken der Bilder (**Bild 2**), die in Folge der indirekten Beleuchtung und der Krümmung der Glasröhren entstehen.

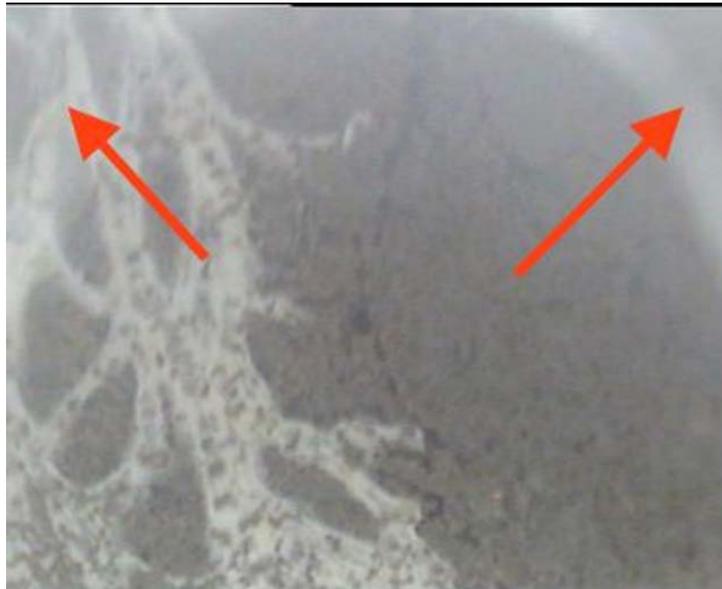


Bild 2: Einzelbild eines Minirhizotron-Bildes. Die Überstrahlungen in den oberen Bildecken sind mit Pfeilen markiert. Deutlich ist die Mykorrhiza im Bild erkennbar.

Diese hellen Bereiche können Wurzeln überstrahlen und so Probleme bei der Identifikation der Wurzeln verursachen und zu Ungenauigkeiten bei der Bildauswertung führen. Besonders störend sind die hellen Bereiche bei zusammengesetzten Bildern. Mit Hilfe einer softwaretechnischen Verrechnung von Hintergrundbildern ohne Wurzeln (sogenanntes Nullbild) und den aufgenommenen Wurzelbildern lassen sich diese Bereiche ausgleichen und so die Bildqualität verbessern.

Zur Erstellung eines Gesamtbildes werden die Einzelbilder überlappend zusammengesetzt, dabei lassen sich die horizontale (DX) und die vertikale (DY) Bildüberlappung manuell einstellen. Eine leichte Verzerrung des Bildes lässt sich durch eine Bildrotation (DW) korrigieren, so dass ein Gesamtbild entsteht (**Bild 3**).

Zudem lässt sich durch die Bildverarbeitung die Bildqualität verbessern und der „Grauschleier“ in den Bildern herausfiltern. Dies wird durch eine Kontrastdehnung ermöglicht. Die ursprüngliche Verteilung der Helligkeitswerte wird von einem Bereich von 0..255 auf 55..125 gestreckt. Ein Beispiel eines Vorher-Nachher-Bildes ist in **Bild 3** zu sehen. Die Wurzelstruktur und die Mykorrhiza sind auf dem Gesamtbild deutlich zu erkennen. Somit wurde durch diese software-technischen Modifikationen eine deutliche Verbesserung der Bildqualität der Farbkamera für die anschließende Auswertung und Interpretation der Bilder ermöglicht.



Bild 3: Zusammengesetztes Gesamtbild vor (A) und nach (B) der software-technischen Optimierung. Folgende Schritte wurden durchgeführt: Subtraktion eines Nullbildes, Veränderung der Verteilung der Helligkeitswerte von ursprünglich 0..255 auf einen Bereich von 55..125. Drehung (DW) um 2°.

Literaturverzeichnis

- MAJDI H., PREGITZER K., MORÉN A.-S., NYLUND J.-E., ÅGREN G.I. (2005):** Measuring Fine Root Turnover in Forest Ecosystems. *Plant and Soils* 276 (1-2): 32-75
- SMIT A.L., BENGOUGH A.G., VAN NOORDWIJK M., PELERGRIN S., VAN DE GEIJN S.C. (eds.) (2000):** Root methods – a Handbook. Springer Publisher, Stuttgart, Berlin, New York
- VESTE M. (2012):** Anwendung von optischen Messsystemen zur nicht-destruktiven Erfassung von Wurzeln im Boden. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 78: 81-89
- VESTE M., SCHÄFER H.-P., HARMS J., KAST G. (2013):** Ein neues computergesteuertes Minirhizotron-System zur Erfassung von Wurzeln. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 81: 295-301

Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus zur automatischen Detektion von Wurzeln in schwarz-weiss Minirhizotron-Bildern

Daniel Sachse¹, Martin Weigert¹, Maik Veste²

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Großenhainer Str. 57, 01968 Senftenberg

² CEBra - Centrum für Energietechnologie Brandenburg, Friedlieb-Runge-Strasse 3, 03046 Cottbus
Email: maik.veste@me.com

Zusammenfassung: In den letzten Jahrzehnten wurde die Minirhizotronentechnik entwickelt, die eine nichtdestruktive Beobachtung von Pflanzenwurzeln über einen längeren Zeitraum ermöglicht. Durch die Bildverarbeitungssoftware wird es ermöglicht, Bilder automatisch zu verarbeiten, um die gewünschten Eigenschaften der Wurzeln (z.B. Länge, Breite, Fläche) zu ermitteln. Hierfür müssen die Pflanzenwurzeln in den Bildern von der Software erkannt werden. Mit Hilfe einer Schwarzweiss-Kamera wurden Wurzelbilder im Boden aufgenommen. Um Inhomogenität in der Hintergrundbeleuchtung auszugleichen, wird der Hintergrund vom Wurzelbild subtrahiert. Die nächsten Schritte der Bildbearbeitung umfassen die Objekt/Hintergrundtrennung und die Segmentierung des Binärbildes. Nach der Segmentierung können nun auch die Merkmale der einzelnen Segmente bestimmt werden. Der helligkeitsbasierte Bildverarbeitungsalgorithmus erzielt im Bereich der Wurzelerkennung bereits relativ gute Ergebnisse. Eine weitere Optimierung ist notwendig, um die Genauigkeit zu erhöhen.

Deskriptoren: Minirhizotron, Bildverarbeitung, Objekterkennung, Wurzeln

Abstract: *In recent decades the minirhizotron technique has been developed, which enables a non-destructive observation of plant roots for a prolonged period of time. By image processing software, it is possible to process images automatically and to detect the root characteristics (for example, length, width, area). For this purpose, the plant roots must be recognized in the images by the software. Using a black and white camera pictures were taken root in the soil. To compensate for inhomogeneity in the back-lighting, the background is subtracted from the root image. The next steps of image processing include the object / background separation and segmentation of the binary image. After segmentation, the features of the individual segments can now be determined. The brightness-based image processing algorithm achieved for root detection already relatively good results. A further optimization is necessary to increase accuracy.*

Keywords: minirhizotron, imaging, object detection, roots

1 Einleitung

Für die Untersuchungen des Wurzelwachstums wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Minirhizotronsysteme entwickelt, die eine ungestörte Beobachtung der Feinwurzeln ermöglichen (VESTE 2012). Um die Präzision der Wurzelaufnahmen zu erhöhen und die Arbeitsabläufe bei der Bildaufnahme zu optimieren, wurde ein automatisches Minirhizotronsystem entwickelt (VESTE *et al.* 2013), dessen CCD-Fingerkamera (**Bild 1**) mit Hilfe einer computer-gesteuerten Führung in der Glasröhre positioniert wird. Die erzeugten Einzelbilder werden zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. So kann eine voll-automatische Bilderfassung verwirklicht werden. Allerdings steht für die Bildauswertung und Detektion der Wurzeln keine Software zur Verfügung, die eine voll-automatische Wurzelerkennung ermöglicht, so dass die Bilder manuell durch einen Betrachter ausgewertet werden müssen (VESTE 2012). Verschiedene Ansätze für eine automatische Detektion von Wurzeln wurden entwickelt (JANKOWSKI *et al.* 1995, ERZ *et al.* 2006, ZENG *et al.* 2008, VESTE 2010), aber in der Praxis nicht realisiert.



Bild 1: Schwarzweiss-Fingerkamera mit Spiegel und indirekter Beleuchtung zu Beobachtung von Wurzeln in Minirhizotronen.

2 Entwicklung eines Bildverarbeitungsalgorithmus

Für das automatische Minirhizotronsystem ist es deshalb notwendig einen Bildverarbeitungsalgorithmus notwendig, der es ermöglicht, aus schwarz-weiß Bildern Wurzeln automatisch zu erkennen, um deren Merkmale zu bestimmen. Das Signal der CCD-

Kamera wird über einen USB-Video-Konverter in ein digitales Bild umgewandelt und auf einem Laptop als Bilddatei (JPEG) gespeichert.



Bild 2: Grauwert Bild einer Wurzel aufgenommen mit einer SW-Fingerkamera

In **Bild 2** ist ein Testbild zu sehen, welches das CCD-Kamerasystem liefert. Es handelt sich hierbei um ein Grauwertbild mit den Abmessung 768x576 Pixel. Die Bittiefe des Bildes beträgt 24 Bit und die horizontale sowie vertikale Auflösung liegt bei 96dpi. Das Bild wird indirekt durch mehrere LEDs, welche ringförmig um die Kamera montiert sind, beleuchtet.

3 Hintergrundverbesserung

Allerdings wird durch die Anordnung von Spiegel zu Kamera und Beleuchtung das Bild nicht gleichmäßig belichtet. Zu dem ist eine Reflexion in der Röhre nicht auszuschließen und erschwert zusätzlich eine gleichmäßige Beleuchtung des Bildes. Da der Bildverarbeitungsalgorithmus vor allem auf der Helligkeit basiert, muss eine im ersten Schritt eine Verbesserung des Hintergrundes durchgeführt werden, um das Ergebnis des Algorithmus zu verbessern. Diese Inhomogenität in der Hintergrundbeleuchtung wird durch die Subtraktion eines Dunkelbildes verbessert, das in einem dunklen homogenen Umfeld erstellt wird und nur die unregelmäßige Kamerabeleuchtung auf dem Bild abbildet. Aus fünf Bildern wurde ein Medianbild erstellt, um eventuell auftretende Fremdstörungen auszuschließen. Im nächsten Schritt der Hintergrundverbesserung wird nun das Dunkelbild vom Eingabebild subtrahiert. Dabei bestehen zwei Varianten zur Verfügungen: (I) Subtraktion mittels Offset und (II) Subtraktion mittels Beitragsbildung. Bei der Variante mittels Offset wird das Subtraktionsergebnis mit dem maximalen Grauwert $(255)/2$ addiert, so dass sich die meisten Grauwerte um 128 liegen. Bei der Beitragsbildung werden die die Grauwerte nicht um einen Offset verschoben, so dass die Mehrzahl der Grauwerte im unteren Bereich der Grauwerte liegen. Feine Strukturen im Hintergrund sind bei dieser Variante nicht mehr erkennbar.

4 Objekt/Hintergrundtrennung

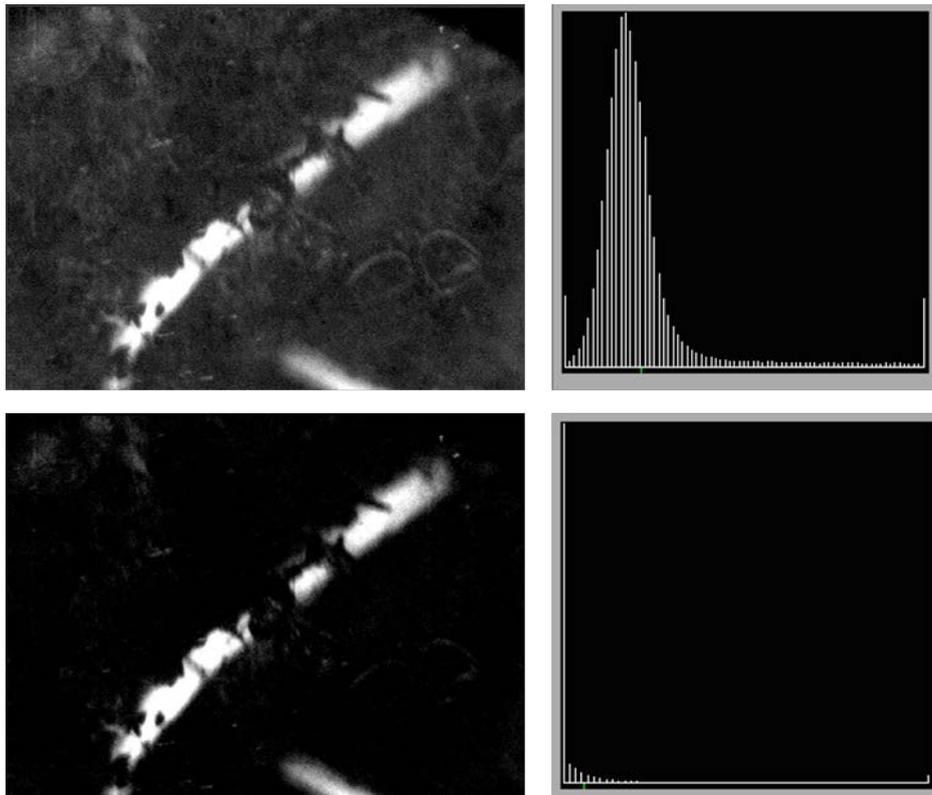


Bild 3: Lineare Verteilung mit Histogramm der Variante I (a) und der Variante II (b)

Der nächste Schritt befasst sich mit der Trennung von Objekt und Hintergrund. Ziel ist es, das Bild so zu binarisieren, dass der Hintergrund schwarz (0) und die gesuchten Objekte weiß (255) sind, so dass es möglichst ist das Bild zu segmentieren. Nach der Subtraktion der zwei Bilder folgt die Kontrastanhebung der Bilder. Diese ist bei einem helligkeitsbasierten Verfahren sehr wichtig, da sich alle folgenden Verfahren auf die Helligkeit der Grauwerte stützen. Diese Kontrastanhebung erreicht man mittels der linearen Streckung oder Verteilung. Da bei einer linearen Verteilung immer zwei Schwellen angegeben werden müssen, welche den zu streckenden Bereich abgrenzen, müssen diese automatisch bestimmt werden. Im Histogramm wird die jeweilige relative Häufigkeit der Grauwerte berechnet, die als Entscheidungsmerkmal sich anbieten. Ein großer Nachteil der linearen Verteilung ist, dass Störungen und Kamerarauschen auch verstärkt werden. Nach mehreren Versuchsreihen wurde ins relative Häufigkeit von 0,001 für die Bestimmung der Grauwertschwellen ermittelt. In **Bild 3a** ist das linear gestreckte Bild der Variante I zu sehen. Der Kontrast wurde erheblich gesteigert und die Strukturen des Bodens sind noch deutlicher erkennbar. Nachteil des Verfahrens ist die Verstärkung des Kamerarauschens. **Bild 3b** zeigt ein linear gestreckte Bild nach Variante II, dessen Ergebnis bereits sehr nahe am gewünschten Ziel, der eindeutigen Trennung von Hintergrund zu Objekt, liegt. Die lineare Verteilung hat allerdings bei diesem Beispiel im oberen linken Teil des Bildes Störungen bzw. Grauwerte des Bildes ver-

stärkt. Hierbei handelt es sich offensichtlich um die Struktur des Hintergrundes. Durch eine Zusammenfassung von Grauwerten kann eine Reduktion der Anzahl der Störungen erzielt werden. Grauwertbereiche werden zu Stufen zusammengefasst, welche alle denselben Wert haben. Dieses Verfahren nennt man Äquidensitenfilterung und wurde ausgewählt, da es völlig automatisch ablaufen kann.

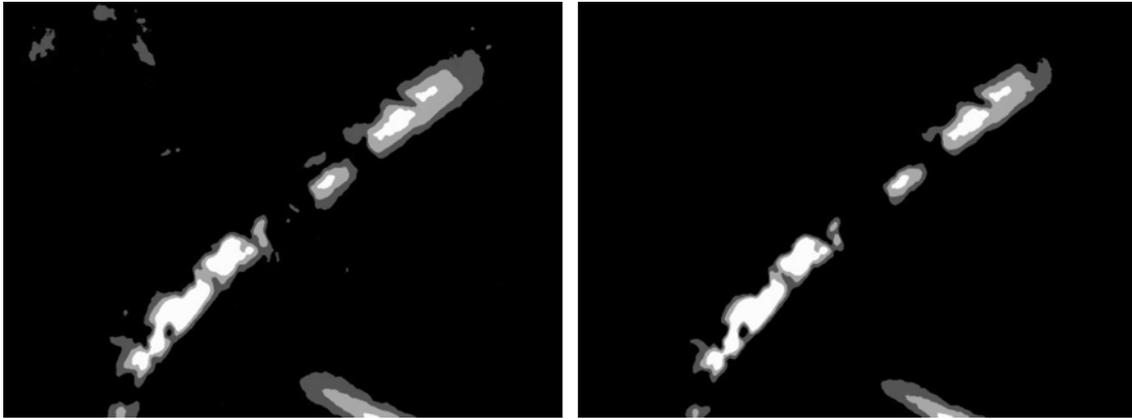


Bild 4: Glättung mit Rangordnungsfiler der Variante I (a) und der Variante II (b)

Durch die Verwendung von Rangordnungsfiler, die sehr häufig für die Unterdrückung von Bildrauschen verwendet werden, können die Störungen im Hintergrund weiter verringert, um eine möglichst saubere Trennung von Objekt zu Hintergrund zu erreichen.

Nach mehreren Tests mit verschiedenen Rangordnungsfilern und verschiedenen Fenstergrößen sind in **Bild 4** die besten Ergebnisse zu sehen. In beiden Fällen handelt es sich hier um eine Fenstergröße von 7x7 und einen Median Filter. Denn je größer die



Bild 5: Binarisiertes Bild der Variante I (a) und der Variante II (b)

Fenstergröße gewählt wird, umso mehr Nachbarpixel werden verwendet, um den Wert des aktuellen Pixels zu verändern. Ist die Fenstergröße also relativ groß, ist es wahrscheinlicher, dass Störungen oder Rauschen verschwinden. Außerdem wird das Bild stärker geglättet, je größer das Fenster ist. Der letzte Schritt zur Trennung von Objekt

und Hintergrund ist die Binarisierung (**Bild 5**). Die Binarisierung muss erfolgen, damit eine Segmentierung mittels Zeilenkoinzidenzverfahren möglich ist.

5 Segmentierung des Binärbildes

Die Segmentierung ist der erste Schritt bei der Analyse des Bildes. Unter einer Segmentierung versteht man die Zuordnung eines Pixels zu einem Segment. Zusammenhängende Segmente können auch als Objekte beschrieben werden. Ist jeder Pixel mindestens einem Segment zugeordnet, spricht man von einer vollständigen Segmentierung. Die automatische Segmentierung kann in folgende drei Verfahren unterteilt werden: das pixel-, kanten-, und regionenorientierte Verfahren. Bevor die Merkmale der Objekte aus den Bildern berechnet werden können, ist eine Segmentierung des Bildes notwendig. Das zuvor binarisierte Bild wird mittels Zeilenkoinzidenzverfahren segmentiert. Bei diesem Verfahren wird das Bild Zeile für Zeile abgearbeitet und dabei jeder Pixel einem Segment zugeordnet. Diese Zuordnung kann in 4er oder 8er Nachbarschaft erfolgen. Bei einer 4er Nachbarschaft entscheiden der darüber gelegene und der links gelegene Pixel über die Angehörigkeit zu einem bestimmten Segment. Bei der 8er Nachbarschaft kommt der Pixel diagonal links oben dazu. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist also die Anzahl der gefundenen Regionen, die dazugehörigen Ortspunkte sowie eine Liste aller Bildpunkte der jeweiligen Regionen.

Die folgenden Abbildungen zeigen nun die segmentierten Bilder in einer Falschfarbendarstellung. **Bild 6** zeigt jeweils die Segmentierung auf Grund einer 8er Nachbarschaft. Die 8er Nachbarschaft hat den Vorteil, dass Bildpunkte zu einem Segment dazugehören, selbst wenn die Pixel diagonal zueinander liegen. Dadurch entstehen größere und zusammenhängendere Objekte.

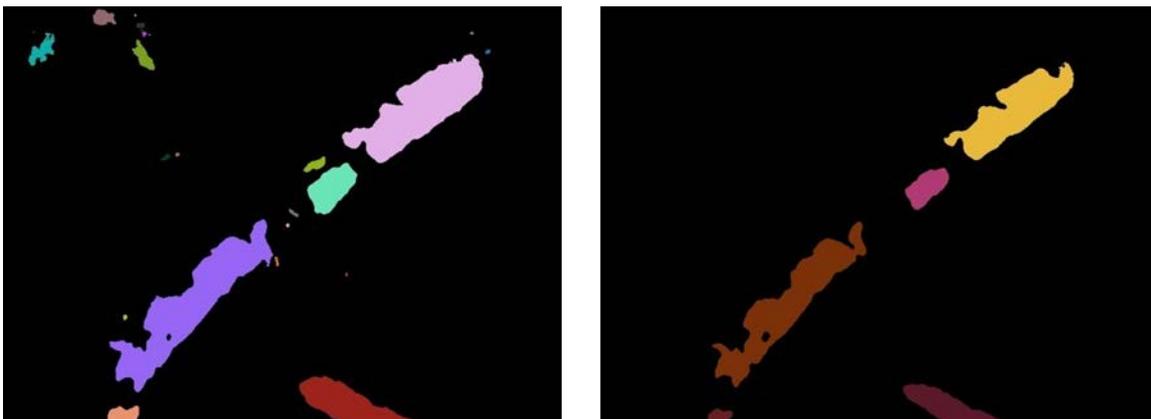


Bild 6: Segmentierung Variante I (a) und Variante II (b)

In der Versuchsreihe der Variante I (**Bild 7a**) wurden 26 Segmente erkannt und in Variante II sind es 6 Segmente (**Bild 7b**). Das liegt daran, dass alle weißen Bildpunkte des Bildes als ein Objekt angesehen werden. Bei der Binarisierung des Bildes der Ver-

suchsreihe 1 sind deutlich mehr Störungen im Hintergrund geblieben, welche nun als Objekte erkannt werden. Diese Störungen könnte man bei einer späteren Auswertung der Merkmale, beispielsweise über die Objektfläche, ausschließen. Bei der Versuchsreihe 2 wurden nur 6 Objekte erkannt. Hier waren nach der Binarisierung keine Störungen mehr vorhanden, sondern nur noch die Wurzel.

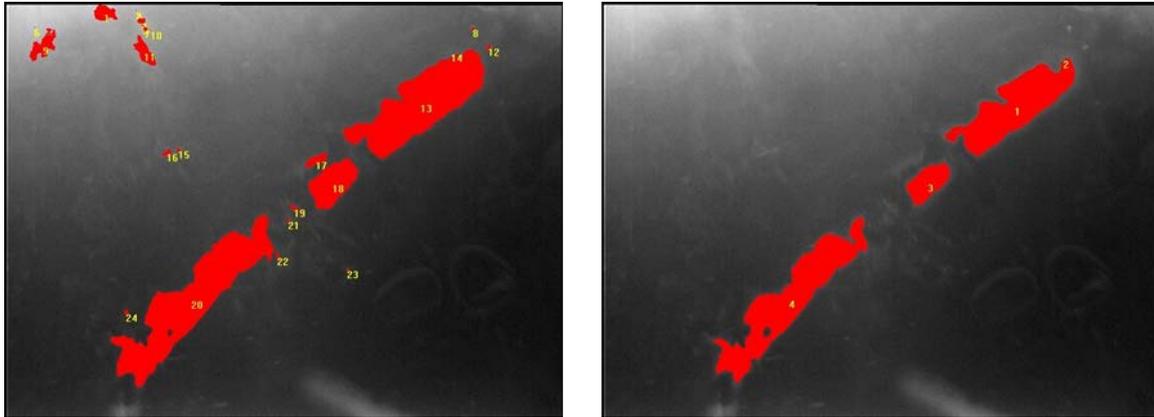


Bild 7: Identifizierte Segmente im Bild der Variante I (a) und der Variante II (b)

6 Merkmalsextraktion

Nach der Segmentierung können nun auch die Merkmale der einzelnen Segmente bestimmt werden. Für den Vergleich der beiden hier beschriebenen Varianten wurden die folgenden Merkmale ausgewählt und bestimmt: die Gesamtfläche, der Umfang, die maximale X-Ausdehnung und die maximale Y-Ausdehnung.

Bild 7a zeigt nun alle Objekte der Variante I, von denen Merkmale bestimmt werden konnten. Objekte, welche den Rand berühren, werden im Testprogramm vernachlässigt, da es sich hierbei nicht um vollständige Objekte handelt. Von zwei Objekten wurden im diesem Fall keine Merkmale bestimmt, da es sich bei diesen um Randsegmente handelte. Es wurden also von insgesamt 24 Objekten die Merkmale bestimmt. Die Gesamtfläche der Wurzel würde bei dieser Variante 29443 Pixel betragen. Zusätzlich sind 6 kleine Störungen (Fläche 1-10 Pixel), 11 mittlere Störungen (11-100) und 3 (101-775) große Störungen im Bild vorhanden. Die letzteren Störungen machen es sehr schwer, die richtigen Objekte als Wurzel zu betrachten. Man könnte zwar Störungen auf unterschiedliche Art und Weise über die Merkmale herausfiltern, geht aber gleichzeitig das Risiko ein, relevante Bereiche mit auszuschließen. Beispielsweise wäre es möglich, Störungen, welche unterhalb einer bestimmten Fläche liegen, zu ignorieren. In diesem Beispiel müsste dieser Wert bei 776 liegen, um alle Störungen herauszufiltern. Dies würde aber dazu führen, dass Objekt 17, welches zur Wurzel gehört, ebenfalls vernachlässigt wird und in der Gesamtheit fehlt. Mithilfe der Variante II sind, wie in **Bild 7b** zu sehen, ausschließlich Objekte der Wurzel erkannt worden. Hier wurden somit durch die Bildvorverarbeitung alle Störungen im Bild ausgeschlossen, was den großen Vorteil mit sich bringt, dass keine Daten von Störungen mit in eine Statistik eingehen. Diese Vari-

ante ist also, was die Störungen im Bild anbelangt, besser als Variante I. Die Gesamtfläche der Wurzel dieser Variante beträgt 22716 Pixel, was jedoch im Vergleich zu Variante I ca. 22,85% weniger Pixel bedeutet. Das könnte eine Abweichung zur realen Wurzel darstellen. Wie groß diese Abweichungen zu den realen Wurzeln sind, muss durch Vergleichsmessungen allerdings noch ermittelt werden.

7 Fazit und Ausblick

Der helligkeitsbasierte Bildverarbeitungsalgorithmus erzielt im Bereich der Wurzel-erkennung bereits relativ gute Ergebnisse. Die beiden miteinander verglichenen Varianten liefern relativ ähnliche Ergebnisse. In Variante I sind zwar mehr Störungen vor der Segmentierung vorhanden, aber dafür ist die Wurzel scheinbar ohne große Verluste erkannt worden. In der vorgestellten Variante verblieben so gut wie keine Störungen im Bild. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, parallel zu dem helligkeits-basierten Verfahren ein kantenorientiertes Verfahren zu entwickeln und die Ergebnisse beider Verfahren zu verknüpfen. Ein kantenorientiertes Verfahren muss auch dann hinzugezogen werden, wenn das „Versuchserdreich“ eine ähnliche Farbgebung wie die Wurzeln aufweist, da helligkeitsbasierte System an seine Grenzen stößt, da Wurzel und Hintergrund sehr ähnliche Grauwerte besitzen. In diesem Fall wird es sehr schwierig brauchbare Ergebnisse zu erlangen. Um auch diesem Problem entgegen zu wirken, wird eine Weiterentwicklung des bestehenden Kamerasystems vorgenommen. Der Einsatz einer Farbkamera eröffnet neue Möglichkeiten für einen Bildverarbeitungsalgorithmus. Es ist mithilfe von Farbbildern möglich, Farbkanäle einzeln zu betrachten oder über die Farbe bestimmte Objekte im Bild von einer Analyse auszuschließen. Gleichzeitig wird auch die Beleuchtung der Kamera optimiert, um eine inhomogene Ausleuchtung des Bildes vorzubeugen.

Danksagung

Die Entwicklung der automatischen Minirhizotron-Anlage wurde mit dem Großen Innovationsgutschein des Landes Brandenburg finanziell unterstützt. Wir danken der Firma Umweltanalytische Produkte GmbH, Cottbus für die Kooperation.

Literaturverzeichnis

ERZ G., VESTE M., ANLAUF H., BRECKLE S.-W., POSCH S. (2005): A region and contour based technique for automatic detection of roots of tomatoes in minirhizotron images. *Applied Botany and Food Quality* 79: 83-88

JANKOWSKI M., BRECKLE S.-W., SAGERER G., POSCH S., VESTE M. (1995): Automatische Detektion von Wurzelsystemen in Minirhizotron-Bildern. In: SAGERER G., POSCH S., KUMMERT F. (Hrsg.): *Mustererkennung 1995. Informatik aktuell*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 176-185

- VESTE M. (2010):** Anwendung automatischer Verfahren zur Erfassung von Wurzeln in Minirhizotron-Bildern. Bornimer Agrartechnische Berichte 73: 72-78
- VESTE M. (2012):** Anwendung von optischen Messsystemen zur nicht-destruktiven Erfassung von Wurzeln im Boden. Bornimer Agrartechnische Berichte 78: 81-89
- VESTE M., SCHÄFER H.-P., HARMS J., KAST G. (2013):** Ein neues computergesteuertes Minirhizotron-System zur Erfassung von Wurzeln. Bornimer Agrartechnische Berichte 81: 295-301
- ZENG G., BIRCHFIELD S.T., WELLS C.E. (2008):** Automatic discrimination of fine roots in minirhizotron images. *New Phytologist*, 177: 549–557

In der Reihe**Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

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

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005
Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005

Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006
Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007

Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrens- technische Forschung im Nacherntebereich	2009
Heft 66	16. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau	2009
Heft 67	Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis- Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist- Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissys- tems	2009
Heft 68	Wieviel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss- Symposium des "Biogas-Crops-Network" (BCN) 7. Mai 2009 Potsdam	2009
Heft 69	Image Analysis for Agricultural Products and Processes 27 to 28. Aug. 2009 Potsdam	2009
Heft 70	5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management 31. Aug. to 02. Sept. 2009 Potsdam	2009
Heft 71	Einsatz von Biogas in PEM-Brennstoffzellen	2009
Heft 72	Teilflächenspezifische Grunddüngung	2009
Heft 73	16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 04. Mai 2010 Braunschweig	2010
Heft 74	Erschließung von Nachhaltigkeitspotenzialen durch Nutzung innovativer Sensortechnologien <i>-Prozesskette Getreide-</i>	2010
Heft 75	Erschließung von Nachhaltigkeitspotenzialen durch Nutzung innovativer Sensortechnologien <i>-Prozesskette pflanzliche Frischeprodukte-</i>	2010
Heft 76	International Workshop The future of the quarter individual milking 14. – 15. September 2010 Potsdam	2010
Heft 77	A flow cytometric approach to monitor the effects of gentle preservation techniques in the postharvest chain	2011
Heft 78	17. und 18. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirt- schaft 05. Mai 2011 Stuttgart und 09. Mai 2012 Osnabrück	2012

Heft 79	2. Öffentliches Symposium des „BCN“ BiogasPOTENZIALE Erkennen, Erforschen, Erwirtschaften	2012
Heft 80	Mechanisms of Bacillus spore germination and inactivation during high pressure processing	2013
Heft 81	19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft 06. – 07. Mai 2013 Berlin	2013
Heft 82	3rd Global Workshop on Proximal Soil Sensing	2013
Heft 83	19. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau 11. – 12. März 2014 Dresden	2014
Heft 84	Prozessmikrobiologie in landwirtschaftlichen Biogasanlagen Schlussbericht zum Forschungsverbund BIOGAS-BIOCOENOSIS	2014
Heft 85	Sensoren. Modelle. Erntetechnik Kolloquium zur Verabschiedung von Dr. Ehlerlert 27. Mai 2014, Potsdam-Bornim	2014
Heft 86	Phosphor für die Landwirtschaft – Strategien für eine endliche Ressource 11. Juni 2014, Potsdam-Bornim	2014
Heft 87	Biofilme in Biogasanlagen - Struktur, Einfluss auf die Bio- gasausbeute und Optimierung technischer Systeme zur Rück- haltung der mikrobiellen Biomasse BIOGAS-BIOFILM	2015
Heft 88	20. und 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirt- schaft 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft 26. Mai 2014, Osnabrück und 06. und 07. Mai 2015, Braun- schweig	2015

Interessenten wenden sich an:

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

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

Schutzgebühr: 13,- €