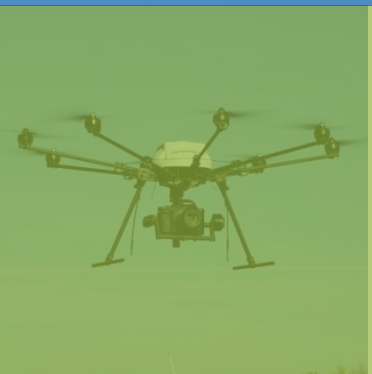


▲ Hochschule Harz



**22. Workshop Computer-Bildanalyse
und Unbemannte autonom fliegende
Systeme in der Landwirtschaft**
**23. Workshop Computer-Bildanalyse
in der Landwirtschaft**



21. April 2016, Wernigerode
27. April 2017, Potsdam-Marquardt



Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 93

Wernigerode 2016 / Potsdam-Bornim 2017

**22. Workshop Computer-Bildanalyse
und Unbemannte autonom fliegende
Systeme in der Landwirtschaft**
**23. Workshop Computer-Bildanalyse
in der Landwirtschaft**

21. April 2016, Wernigerode
27. April 2017, Potsdam-Marquardt

Bornimer Agrartechnische Berichte
Heft 93

Wernigerode 2016 / Potsdam-Bornim 2017

Herausgeber:

Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie 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>

April 2017

Redaktion:

Frieder Stolzenburg
Hardy Pundt
Michael Pflanz
Michael Schirrmann

Typografische Gestaltung:

Andrea Gabbert

Bildnachweis Cover:

Kiebitz: Andreas Trepte, www.avi-fauna.info, Lizenz: CC BY-SA 2.5

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 und Bioökonomie e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V., 2017

Inhalt	Seite
Grußwort	9
Aussteller:	
• geo-konzept GmbH, Adelschlag	10
• Optris GmbH, Berlin	11
• Ocean Optics EMEA, Ostfildern	12
• CiS GmbH, Rostock	13
• insensiv GmbH, Bielefeld	14
• LemnaTec GmbH, Aachen	15
• ProCopter GmbH, Leipzig	16
Unbemanntes Kippflügel-Flugsystem für vollautomatisierte, großflächige Multi-Sensorik-Agraranwendungen <i>Christian Eschmann</i>	17
Photogrammetrische Vermessung landwirtschaftlicher Nutzflächen aus der Luft unter Nutzung eines Low Cost Differenz GPS Systems zur Aufdeckung archäologischer Fundstellen <i>Heinrich Warmers, Gerson H. Jeute, Martin von Kameke</i>	28
Multikopter und Infrarottechnologie <i>Matthias Oelze, Falk Schmidberger, Frieder Stolzenburg</i>	41
Flourish – a robotic approach for automation in crop management <i>Frank Liebisch, Johannes Pfeifer, Raghav Khanna, Philipp Lottes, Cyril Stachniss, Tillmann Falck, Slavomir Sander, Roland Siegwart, Achim Walter, Enric Galceran</i>	53
Sensorteststand zur Evaluierung bildgebender Sensoren mit dynamisch-reproduzierbaren Störgrößen <i>Christian Scholz, Wolfram Strothmann, Fabian Lanckenau, Daniel Schmunkamp, Fabian Sellmann, Arno Ruckelshausen</i>	64
Klassifikation von Pflanzenorganen basierend auf Geometrie- und Farbdeskriptoren in 3D-Punktwolken <i>Johann Christian Rose, Heiner Kuhlmann</i>	75
Erkennung und Quantifizierung von Symptomen der Maiskolbenfusariose auf der Innenseite längs halbirter Maiskolben mit automatischer Spektralanalyse <i>Martin Kraft, Elisabeth Oldenburg</i>	90

Hyperspectral detection of Diaporthe /Phomopsis complex on soybean infested seeds	97
<i>Gerassimos Peteinatos, Kim Haug, Abbas El-Hasan, Behnoush Hosseini, Ralf T. Voegelé, M. Pilar Cendrero-Mateo, Ortrud Jäck, Uwe Rascher, Roland Gerhards</i>	
Vergleich von traktorgestützter und UAV-gestützter Bestandestemperaturerfassung im Winterweizen	99
<i>Rikard Graß, Sabrina Nagler, Ulf Böttcher, Hella Ahrends, Henning Kage</i>	
Nachweis der Wirkung von Zuschlagstoffen zur Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit in agrarisch genutzten Böden Brandenburgs und die Entwicklung der Kulturpflanzen mittels Copterbefliegungen mit NIR- und RGB-Kameras	105
<i>Sandra Münzel, Oswald Blumenstein, Daniel Spengler, Annegret Thieken</i>	
Einfluss der Pflanzenernährung auf die Chlorophyllabbaurate bei <i>Solanum lycopersicum</i>	114
<i>Namora Dietz, Chun-Fai Yu, Stefan Heimrich, Dirk Jäger, Michael Pflanz, Manuela Zude Sasse</i>	
UAS-gestützte Bilanzierung von Torfabbauf Flächen – Ein prototypischer Ansatz zur Integration von 3D-Punktwolken zur halbautomatisierten Klassifikation von Torfmieten in ArcGIS	119
<i>Philipp Stüwe, Torsten Prinz, Imre Sajtos</i>	
Ein optimiertes UAV-Hyperspektralkamera-Konzept für den Einsatz in Zuchtgärten und der Landwirtschaft	127
<i>David Kiliás, Katharina Holstein, Udo Seiffert</i>	
Biomasseermittlung mit Leichtbaukopter und Integration in ein Agrarmanagementsystem	135
<i>Ludwig Schrenk</i>	
ThünoCopter – ein Mehr-Kamera-System für landwirtschaftliche Fragestellungen	146
<i>Heiko Neeland, Tina Langkamp, Martin Kraft</i>	
Pod-Copter – ein Kabelgebundenes und autonom fliegendes UAV zum Einsatz als zeitlich unbegrenzte Trägerplattform in der Landwirtschaft	159
<i>Christian Gieselmann</i>	
Stop coding – Start analysing: High throughput plant analysis with LemnaTec Image Processing	169
<i>Stefan Paulus, Tino Dornbusch, Marcus Jansen</i>	

Inhalt	Seite
Grußwort	181
Aussteller:	
• geo-konzept GmbH, Adelschlag	182
• Ocean Optics EMEA, Ostfildern	183
• CiS GmbH, Rostock	184
• insensiv GmbH, Bielefeld	185
• LemnaTec GmbH, Aachen	186
• Hexapilots	187
Maschinelles Lernen für Anwendungen in der Landwirtschaft <i>Ribana Roscher</i>	189
Automatische Ableitung geometrischer Pflanzenparameter im Feldversuchswesen aus hochaufgelösten UAS-Aufnahmen am Beispiel von Eisbergsalat und Blumenkohl <i>Görres Grenzdörffer</i>	190
Monitoring the dynamics of wheat stem elongation: Genotypes differ at critical stages and in growth response to temperature <i>Lukas Kronenberg, Kang Yu, Achim Walter, Andreas Hund</i>	199
Hocheffiziente Analyse hyperspektraler Bildzeitreihen zur Detektion und Charakterisierung von Pflanzenkrankheiten <i>Jan Behmann, David Bohnenkamp, Matheus Kuska, Stefan Thomas, Mirwaes Wahabzada, Christoph Römer, Peter Schmitter, Lutz Plümer, Anne-Katrin Mahlein</i>	208
Nicht-invasive, objektive Detektion von Echtem Mehltau der Gerste auf Blatt- und Bestandesebene mittels hochaufgelösten hyperspektralen Aufnahmen und modernen Analysemethoden <i>Stefan Thomas, Jan Behmann, Mirwaes Wahabzada, Uwe Rascher, Anne-Katrin Mahlein</i>	216
Remote Sensing im Agrarbereich mittels hyperspektraler Kamertechnologie von Cubert <i>Thore Klink, Timo Bressmer</i>	223
Aus- und Weiterbildungskonzepte zu bildgebenden Sensorsystemen in der Agrartechnik <i>Arno Ruckelshausen, Axel Höh, Andreas Linz</i>	232
UAV-gestützte Detektion von Kiebitznestern in Agrarflächen <i>Martin Israel</i>	238

Erfassung des realen Messerzustandes von selbstfahrenden Feldhäckslern unter Verwendung automatisierter Bildauswertung	247
<i>Manuel Schneider, Martin Schweigel, Christian Walther, Luise Merbach, Sebastian Hartwig, Andreas Wenzel, Frank Beneke, Jochen Huster</i>	
Pod-Copter - ein kabelgebundenes und autonom fliegendes UAV zum Einsatz als zeitlich unbegrenzte Trägerplattform in der Landwirtschaft	262
<i>Christian Gieselmann</i>	
Raspberry Pi / ROS-basiertes Low-Cost-Multikamerasystem zum mobilen Einsatz im Feldversuchswesen	279
<i>Matthias Igelbrink, Axel Höh, Andreas Linz, Arno Ruckelshausen</i>	
Evaluierung der Sensorik an aktuellen Feldphänotypisierungsanlagen	288
<i>Stefan Paulus, Christopher Schardt, Hans-Georg Luigs, Solmaz Hajmohammadi, Tino Dornbusch</i>	
Application of RGB imaging in monitoring quality changes of sweet potatoes during drying	297
<i>D.I. Onwude, N. Hashim, K. Abdan, S.N. Che Adan, A. Jalaluddin</i>	
Copernicus 4ECA Satellitenfernerkundung zur Inventarisierung potentieller ökologischer Vorrangflächen auf Minderertragsarealen in Agrarlandschaften	298
<i>Christoph Sinn, Matthias Stängel, Sandra Lohberger, Burkhard Golla, Jonas Franke</i>	
Nachweis von trockenstressinduzierten Entwicklungsunterschieden zweier Winterweizensorten mittels multispektraler Vegetationsindizes	299
<i>Sandra Münzel, Daniela Walch, Oswald Blumenstein</i>	
Herausforderungen der Feldphänotypisierung in der Rebenzüchtung	319
<i>Anna Kicherer, Katja Herzog, Lasse Klingbeil, Udo Seiffert, Reinhard Töpfer</i>	
Digitale Geländemodelle als Grundlage von UAV-Tiefflügen mit konstanter Höhe über Grund und als Ergebnis von Flächenbefliegungen	326
<i>Ludwig Schrenk, Mirko Bothe, Sergej Krukouski</i>	
Entwicklung eines prototypischen Bildanalyse-Workflows von entomologischen Gelbtafeln in ArcGIS mit Hilfe des ModelBuilders	332
<i>David Ott, Timon Gottschlich, Torsten Prinz</i>	
Nicht-invasive Detektion und Differenzierung von Pilzerkrankungen im Weizen auf der Blattebene mittels Hyperspektralsensoren	340
<i>David Bohnenkamp, Jan Behmann, Anne-Katrin Mahlein</i>	
Analyse und Klassifizierung von Hyperspektralaufnahmen auf der Basis proprietärer Softwareentwicklungen	346
<i>Joachim Intreß</i>	

Kontrolle des Fruchtwachstums mit Smartphone-Kamera	347
<i>Thorsten Rocksch, Wenjuan Yu, Franz Kirchberger, Uwe Schmidt</i>	
Abschätzung der Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturen auf Basis von UAV-Spektraldaten und deren Änderung am Beispiel unterschiedlicher Landnutzungssysteme	356
<i>Philipp Rauneker, Johannes Hufnagel, Gunnar Lischeid</i>	
UAS-basierte Abschätzung von Gründüngungsbiomasse: Bieten photogrammetrisch ermittelte Pflanzenhöhen eine Alternative zu Vegetationsindizes?	357
<i>Lukas Roth, Nicole Berger, Fabienne Bauer, Bernhard Streit</i>	
Nutzung von boden- und luftgestützten Spektraldaten zur Optimierung der Stickstoff Düngung in der Zuckerrübe	363
<i>Corinne Müller-Ruh, Frank Liebisch, Johannes Pfeifer, Achim Walter</i>	
UAV-gestützte Reflexionsmessungen zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe des NDVI am Beispiel eines Trockenstressversuches	373
<i>Tina Langkamp, Martin Kraft, Heiko Neeland, Katja Matschiner, Lorenz Kottmann, Susanne Schroetter, Siegfried Schittenhelm</i>	
Design of an Agricultural 3D-Plant-Camera by applying Modern Image Analysis Algorithms to a Single Camera for the Identification of Morphological Plant Parameters - Part I Basic Methods and Algorithms -	382
<i>Minhui Li, Cornelia Weltzien, Volker Dworak, Morten S. Laursen</i>	
In der Reihe Bornimer Agrartechnische Berichte	388
sind bisher erschienen:	

Grußwort

Das Workshop-Format "Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft" ist auch mehr als 20 Jahre nach seiner Begründung durch das damalige Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB) immer noch aktuell. Ziel der Workshop-Reihe ist unter anderem die Vertiefung des Erfahrungsaustauschs zwischen den Forschergruppen in der Anwendung von bildgebenden und spektroskopischen Methoden in der Landwirtschaft. Diese sich rasch entwickelnden Technologiefelder werden verstärkt auch in der Landwirtschaft zum Monitoring von Vor- und Nachernteprozessen genutzt. Für landwirtschaftliche Anwendungsfälle sind jedoch häufig keine passenden Lösungen verfügbar, so dass für die spezifischen Einsatzbedingungen eigenständige Lösungen in Zusammenarbeit von zielgerichteter Grundlagenforschung und Wirtschaftsunternehmen entstehen.

Um die oben genannten Anwendungen zu realisieren, kamen in den letzten Jahren zunehmend Multikopter zum Einsatz, die die Computer-Bildanalyse und andere Agraranwendungen vollautomatisch und berührungslos durchzuführen erlauben. Konsequenterweise wurde daher der Workshop zur Computer-Bildanalyse zum wiederholten Male gemeinsam mit dem Workshop "Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landschaft" durchgeführt. Die Anwesenheit vieler Unternehmen, Forschungsinstitutionen, Hochschulen und Behörden belegt die wichtige Bedeutung dieser zusammengefassten Workshop-Veranstaltung für einen schnellen Wissenstransfer.

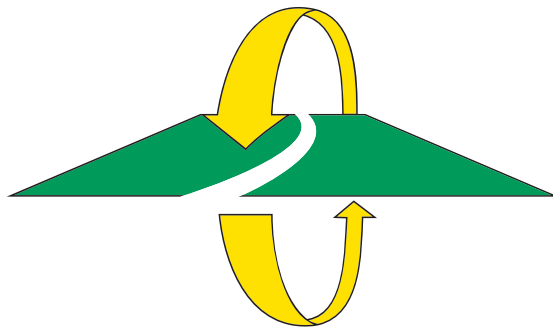
2016 findet der Workshop zum ersten Male an der Hochschule Harz in Wernigerode statt, die 1991 auf dem Gelände der ehemaligen Fachschule für Landwirtschaft in Wernigerode entstand, organisiert von Mitgliedern des Fachbereichs Automatisierung und Informatik. Wie in den Vorjahren deckt der Workshop eine große Bandbreite von Themen ab wie die berührungslose Sensorik, automatische Bildanalyse mit unterschiedlichen Kameras, Multikopter-Technologie und Hyperspektralanalysen einschließlich des Infrarot-Bereichs.

Allen Beitragenden durch Vorträge, Poster, Messestände oder Diskussionsbeiträge sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Wir wünschen allen Teilnehmern einen interessanten, erfolgreichen und inspirierenden Workshop. Ebenfalls bedanken möchten wir uns ausdrücklich auch bei allen helfenden Händen, die zur erfolgreichen Vorbereitung und Durchführung des Workshops sowie zur gelungenen Erstellung des Tagungsbands beigetragen haben.

Frieder Stolzenburg

Hardy Pundt

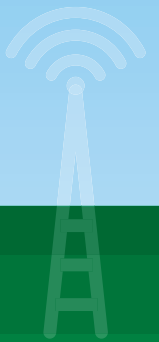
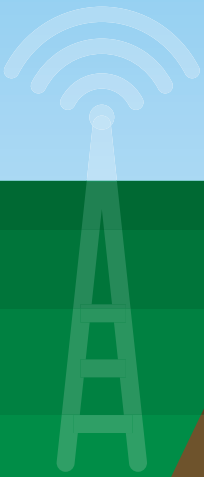
Wernigerode, Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik



geo-konzept
inventarisieren • kartieren • optimieren



AUTOMATISCHE LENKUNG • TELEMETRIE • ANBAUGERÄTESTEUERUNG • ISOBUS
RTK-NETZWERK • GLONASS • GPS • KORREKTURDATEN
GIS • FERNERKUNDUNG • UAV
FARM MANAGEMENT



Die **Optris GmbH** ist einer der führenden und innovativsten Hersteller von Geräten zur berührungslosen Temperaturmessung. Optris entwickelt und produziert tragbare und stationäre Infrarot-Thermometer für eine punktuelle Temperaturmessung sowie Online-Infrarotkameras für eine thermografische Echtzeitanalyse.

Maxime	Innovative infrared thermometers – Hohe Qualität zu zeitgemäßen Preisen
Gegründet	2003
Geschäftsführer	Dr.-Ing. Ulrich Kienitz
Gesellschaftsform	GmbH
Unternehmenssitz	Berlin
Produkte	Handthermometer, stationäre IR-Thermometer und Infrarotkameras
Mitarbeiter	ca. 90 (inkl. Auszubildende)
Entwicklung	Deutschland
Produktion	Deutschland
Absatzmärkte	Weltweit (über ein Distributoren-Netzwerk)
Branche	Industrielle, berührungslose Temperaturmesstechnik
Auszeichnungen	Innovationspreis Industrie der Initiative Mittelstand 2007 für den optris CTlaser ; TR Award 2012 für die IR USB-Kamera
Zertifizierung	DIN ISO 9001
Partnerschaften	MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG
CSR	Vergabe der Montage- und Verpackungsaufgaben an Behindertenwerkstätten in Berlin; Unterstützung verschiedener Formula-Student-Racing-Teams; Unterstützung von Diplom- und Abschlussarbeiten in den Fachbereichen Informationstechnik, Mechatronik und Elektronik

Weitere Informationen finden Sie unter www.optris.de/ueber-optris



Compact. Affordable. Flexible.

Flame Blazes a New Path in Modular Spectroscopy

With interchangeable slits, high thermal stability and low unit to unit variation, the Flame spectrometer has forged a new standard in modular spectroscopy. Now Flame has expanded beyond the UV-Vis with the Flame-NIR (950-1650 nm) – compact, affordable and unlike any NIR spectrometer on the market. Choose Flame for:

- Identifying and monitoring ingredients and finished products at all process points
- Measuring the colour and consistency of solids and liquids
- Measuring parameters of raw and processed ingredients

Use Flame from lab to line to reduce costs and ensure consistent quality in all of your products.



MAY 10-13 | MESSE MÜNCHEN

Visit us at Booth A2.127



CiS GmbH
18182 Bentwisch, Hansestr. 21
Telefon: 0381/6302700
Fax: 0381/6302730
Email: info@cis-rostock.de
Internet: www.cis-rostock.de

Die CiS GmbH kann auf eine über 30-jährige Tradition bei der Arbeit mit graphischen und geographischen Informationssystemen verweisen. Das Unternehmen mit seinen 20 Mitarbeitern konzentriert sich auf die Konzeption, Entwicklung, Realisierung von

- Geographischen Informationssystemen – GIS
- Informationssystemen für Leitungsnetze – NIS
- Betriebsmittelinformationssystemen BIS

NIS / BIS – Fachschalen für Netzbetreiber und kommunale Zweckverbände
Geodatenservice

- Vermessungsleistungen
- Planung und Aufbau digitaler Kartenwerke

GIS Bereich Forschung & Entwicklung, Softwareentwicklung

- Informationssysteme für Landwirtschaft, Raumfahrt, Hydrographie,
- Navigationslösungen für die Seefahrt

GIS Bereich Anwendung

- Planung, Aufbau und Führung geographischer Informationssysteme
- Zeichen- und Einmessvorschriften
- Erstellen von Einsatzkonzeptionen

**Flächenbefliegung und 3D-Objektaufnahmen mit Multikopter- und Flächenflieger
Produktion und Vertrieb kompletter UAV-systeme für Landwirtschaft und Andere.**



REFERENZEN

Stadtwerke Rostock, Mainz, Riesa

Netzinformationssysteme

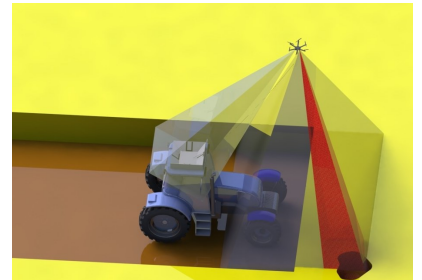
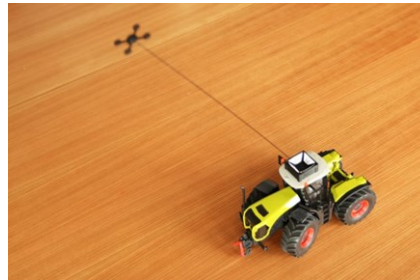
JKI Braunschweig, KSG-Agrar GmbH Kassow

UAV / UAS

Agrargenossenschaft Lindenberg

Agrarmanagementsystem

PodCopter

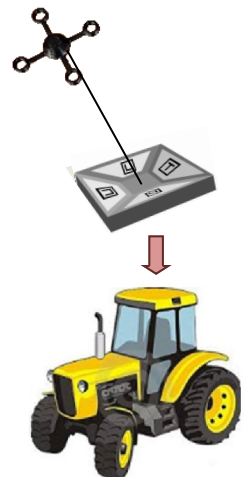


Flugobjekt als kabelgebundene Trägerplattform

Der **PodCopter** nutzt Bildverarbeitung zum dauerhaften Einsatz im Bereich Landwirtschaft.

Er fliegt permanent in vorgegebener Position zum Fahrzeug, dies ermöglicht unbegrenzte Erfassung in Echtzeit (online).

- **Automatischer Start und Landung**
- **Automatische Positionierung zum Fahrzeug**
- **Steuerung on Board** (Positionierung mittels Kamera und Markierung am Fahrzeug)
- **Ausstattung mit beliebiger Sensorik**
 - Thermografie
 - 3D-Technik
 - Spektralmessung
 - Bildverarbeitungssystem
- **unbegrenzte Flugzeit**
- **Sichere Handhabung**
- **Kompatibel mit sämtlichen Fahrzeugen der Landwirtschaft** (Universell Verwendbar)



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

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:

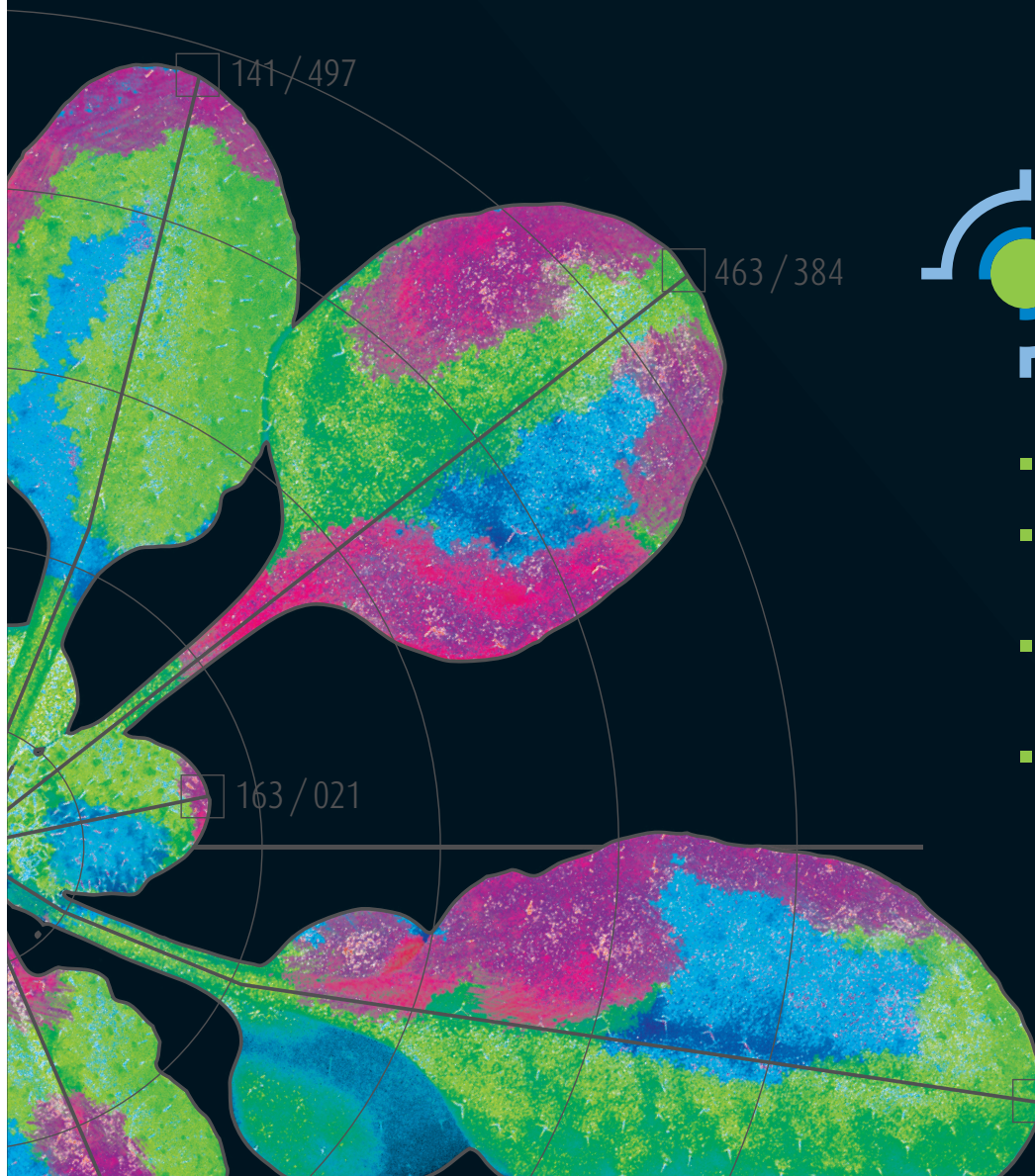
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZIM
Zentrales
Innovationsprogramm
Mittelstand

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

Landwirtschaft



Unser Dienstleistungsspektrum ermöglicht Betriebsmitteleinsparungen durch die Vernetzung aus Luft-, Land- und Bodendaten. Unsere Multicopter ermöglichen eine Analyse, was zu welchem Zeitpunkt gebraucht wird. Spritz- und Düngemittel können nach Bedarf ausgebracht werden.

Mit uns sind Sie effizient, sparsam und bodenschonend – die Umwelt wird entlastet!

Die Auswertung ist entweder durch eine Livebild-Übertragung in Echtzeit oder anhand einer aufbereiteten Dokumentation im Nachhinein möglich.



Kontakt

T: 0341 22 31 39 32
F: 0341 98 97 74 26
www.procopter.de
info@procopter.de

Besucheranschrift

ProCopter GmbH
Ferdinand-Lassalle-Straße 22
04109 Leipzig

Effizienter Düngen:

- » Aufdeckung von Nährstoffmangel und -überschuss
- » Aufdeckung von Unkrautnestern
- » Teilflächenspezifische Ausbringung von Düngemittel
- » Betriebsmitteleinsparungen

Dokumentation:

- » Erfassen von Ernteaufällen & Schäden
- » Detektion von Drainagen



Unbemanntes Kippflügel-Flugsystem für vollautomatisierte, großflächige Multi-Sensorik-Agraranwendungen

Remotely Piloted Tiltwing Aircraft for Automatic Large-Scale Multi Sensor Agricultural Applications

Christian Eschmann, Tobias Ostermann

Institut und Lehrstuhl für Flugsystemdynamik, RWTH Aachen, Wüllnerstr. 7, 52062 Aachen
E-Mail: eschmann@fsd.rwth-aachen.de

Zusammenfassung: Die Anforderungen an zukünftige Anwendungen unbemannter Flugsysteme im Bereich der Landwirtschaft zeigen deutlich, dass vor allem die Punkte *Reichweite*, *Nutzlastkapazität* und *Schwebefähigkeit* wichtige Kriterien für die wirtschaftliche Umsetzung darstellen. Dieser Beitrag beschäftigt sich daher mit den Arbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung und Optimierung unbemannter Kleinstflugsysteme am Lehrstuhl für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen, wobei explizit die Entwicklung eines neuen Systems in Kippflügel-Konfiguration betrachtet wird.

Das Mitte des 20. Jahrhunderts entstandene Kippflügel-Konzept vereint die Vorteile eines Flächenflugzeuges mit denen einer Hubschrauberkonfiguration dahingehend, dass beim Kippflügel die Tragflächen inklusive der in diesen integrierten Antriebskomponenten in der Querachse drehbar gelagert sind und somit VTOL¹-Eigenschaften ermöglichen. Das entwickelte Kippflügel-Flugsystem überzeugt durch stabile Flugeigenschaften über einen breiten Geschwindigkeitsbereich bei hohen Nutzlast-Flugzeit-Konfigurationen. Aufgrund dieser Aspekte eignet sich die Plattform in Bezug auf Agraranwendungen sehr gut als fliegendes Monitor- und Analysesystem, wo es in definierten Flughöhen vollautomatisiert großflächige Gebiete scannt und anhand integrierter berührungsloser Messmethoden eine multimodale Untersuchung über einen längeren Zeitraum erlaubt.

Deskriptoren: Kippflügel, RPA, VTOL

Abstract: *Regarding the usage of remote piloted aircraft systems (RPAS) in terms of future agricultural applications, the requirements for those systems clearly point out important criteria concerning commercial implementation. The main criteria are aspects such as the endurance, payload capacity and hovering capability of the RPAS. This paper focusses on the development and optimisation of RPA systems at the Institute of*

¹ Abkürzung für die Fähigkeit des senkrechten Starten und Landens, im Englischen *Vertical Take-Off and Landing*

Flight System Dynamics (FSD) of RWTH Aachen University and especially the presentation of a new tiltwing RPA development following the criteria mentioned above.

The tiltwing concept being developed in the middle of the 20th century combines the advantages of a fixed-wing aircraft with those of a helicopter. The wings as well as the main propulsion components are rotatably mounted in the transverse axis allowing hovering capabilities and vertical and take-off (VTOL) manoeuvres at the begin and the end of a flight mission, while long-distance flights can be done in an energy efficient fixed-wing mode. The developed tiltwing RPA provides stable flight characteristics over a wide speed range together with an optimised payload-endurance ratio. Therefore the tiltwing platform is a suitable means concerning agricultural applications used as an airborne monitoring and analysis system. I.e. this could be done by scanning large areas fully automated in a defined altitude and using integrated contactless measurement sensors permitting multimodal investigations over a long period.

Keywords: Tiltwing, RPA, VTOL

1 Einleitung

Im Agrarland Deutschland existieren aktuell rund 300 000 landwirtschaftliche Betriebe. Diese Zahl verzeichnet jedoch in den letzten Jahrzehnten einen stetigen Rückgang, der gleichzeitig mit einer steigenden Betriebsgröße einhergeht. Letztere liegt im Durchschnitt in Deutschland bei knapp 56 Hektar. (STATISTISCHES BUNDESAMT 2011)

Der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche an der Gesamtfläche beträgt, vor allem in der Mitte und im Norden Deutschlands, teilweise mehr als 80%. Die landwirtschaftliche Nutzfläche beläuft sich insgesamt dabei auf ca. 16,7 Millionen Hektar, wobei davon wiederum rund 71% in Form von Ackerland vorliegen (I.M.A 2013). Die anteilmäßige Aufteilung der Betriebe nach bewirtschafteter Fläche im bundesdeutschen Durchschnitt ergibt sich nach **Tabelle 1**.

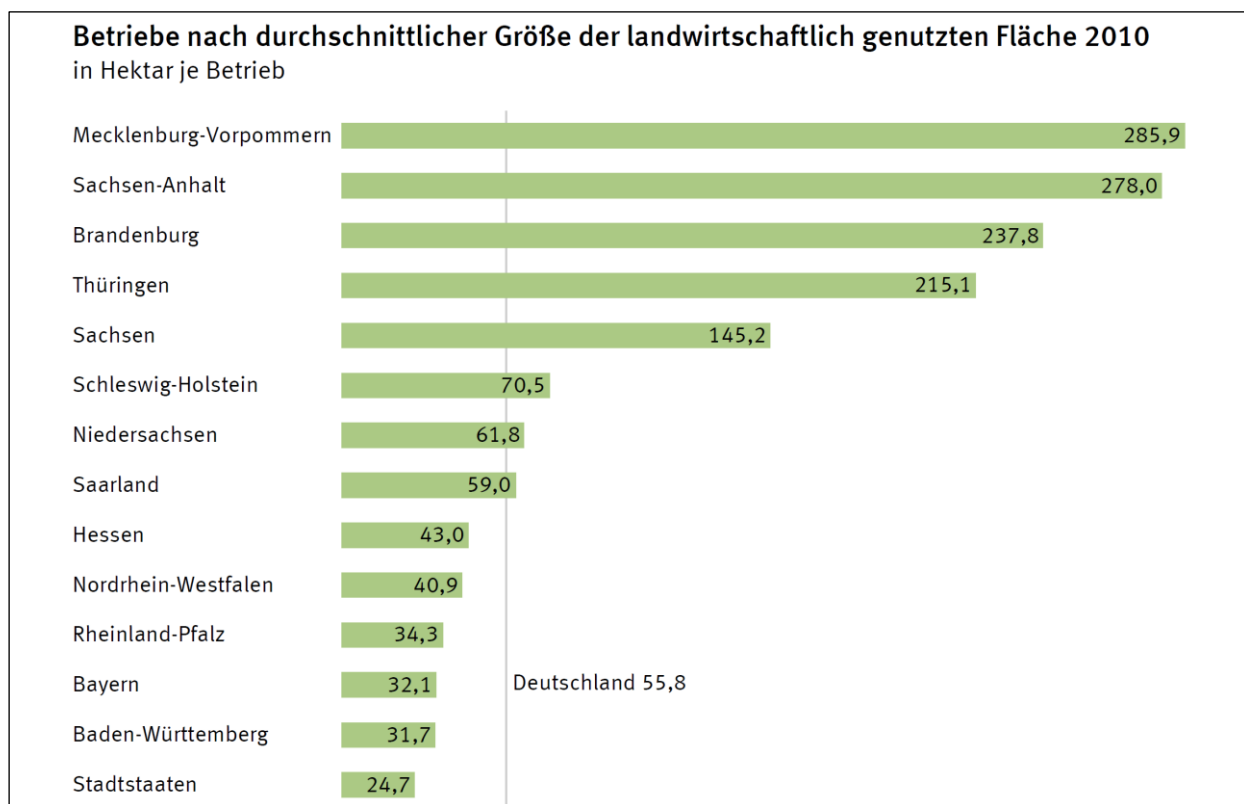


Abbildung 1: Durchschnittliche Größe landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland
(STATISTISCHES BUNDESAMT 2011)

Tabelle 1: Größen landwirtschaftlicher Betriebe in
Deutschland (STATISTISCHES BUNDESAMT 2011)

BETRIEBSGRÖSSE (HEKTAR)	ANTEIL AN GESAMTZAHL (PROZENT)
weniger als 20	46
20 bis 100	43
100 oder mehr	11

Durch die kontinuierlich ansteigende Größe der Betriebe – und damit verbunden der landwirtschaftlichen Nutzfläche – erfordert es in zunehmendem Maße Systeme, die eine schnelle und effiziente Bewirtschaftung dieser Flächen ermöglichen.

Durch den vermehrten Einsatz unbemannter Kleinfluggeräte (en. *Remotely Piloted Aircraft, RPA*) in nahezu allen Anwendungsbereichen, halten diese Systeme auch zunehmend Einzug in Agrarapplikationen (TORRES-SÁNCHEZ *et al.* 2015), wo sie eine flexible sowie kosteneffektive Automatisierungslösung darstellen. Ein Großteil solcher RPA-Anwendungen beschränken sich bislang auf optische Sensorapplikationen, wie die Nutzung visueller (VON BUEREN *et al.* 2015) wie auch multispektraler Kameras (NEBIKER *et al.* 2008), jedoch können mit fortschreitender Sensor- und Flugplattformentwicklung

auch zunehmend andere Verfahren wie LiDAR oder Radar in die Flugsysteme integriert und eingesetzt werden.

2 RPA-Systeme als Agrarapplikationen

2.1 Anforderungen an das Flugsystem

Hinsichtlich der für den Einsatz von RPA in Frage kommenden Bereiche agrartechnischer Anwendungen muss das Fluggerät eine Vielzahl unterschiedlicher Anforderungen erfüllen. Besonders die Kriterien *Reichweite*, *Nutzlastkapazität* sowie *Schwebeflugfähigkeit* stellen wichtige Aspekte der Flugsystemauslegung und -eignung dar. Die Reichweite ist gerade im Hinblick auf die Eignung aktueller RPA-Systeme entscheidend. Die Größe der zu befliegenden landwirtschaftlichen Flächen bedingt die jeweilig geforderte Reichweite, die sich in Abhängigkeit der Flugmuster aus den Größen der durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit sowie der Flugdauer ergibt. Aufgrund rechtlicher Vorschriften ist fast ausnahmslos die Nutzung elektrischer Antriebe vorgeschrieben, sodass die Kapazität der Energiespeicher in Form von Akkumulatoren in der Regel das Auslegungslimit von RPA-Systemen hinsichtlich der Reichweite darstellt. Eng damit verknüpft ist die Nutzlastkapazität, die über Art und Umfang der mitzunehmenden Untersuchungssensorik entscheidet. Die Forderung nach einer Schwebeflugfähigkeit beruht auf der Tatsache, dass in der Regel keine adäquaten Start- und Landeflächen für die RPA zur Verfügung stehen und zudem je nach Gegebenheit auch eine punktuelle Begutachtung realisierbar sein soll. Dem gegenüber steht der Aspekt der Horizontalflugeigenschaften. Diese sind maßgebend für die nicht punktuellen, streckenbezogenen Untersuchungen und sollten in Form einer ausgeprägten Flugstabilität vorliegen. Die Verknüpfung der Aspekte Schwebeflug- und Horizontalflugeigenschaften ist durch das Kriterium Energieeffizienz gegeben, welche Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Einsatzgrenzen des Systems erlaubt. Einen weiteren Aspekt stellt die maximale Fluggeschwindigkeit dar, die ein Maß für die theoretisch erreichbare Begutachtungsfläche darstellt, jedoch in der Praxis limitiert wird durch die Datenrate der Untersuchungssensorik, welche neben der Geschwindigkeit über Grund auch die tatsächliche Flughöhe beeinflusst. Die Größe der Systeme ist im Hinblick auf die Alltagstauglichkeit der Anwendung bezüglich Transport, Aufwand, Handhabung und Kosten ein wichtiges Kriterium der Systemeignung. Mit der Systemgröße – wie auch weiteren, vorgenannten Eigenschaften – geht der Aspekt der Wetterrobustheit einher, der ebenfalls die Alltagstauglichkeit bedingt und zudem hinsichtlich der Reaktion auf äußere Störungen ein Maß für eine Datenqualität darstellt.

Einige der aufgezeigten Anforderungen weisen eine Abhängigkeit voneinander auf. Diese gegenseitige Beeinflussung ist je nach Flugsystemkonzept unterschiedlich stark ausgeprägt und entscheidet über die Gesamteignung einer jeweiligen RPA-Konfiguration in Bezug auf die Anforderungen landwirtschaftlicher Anwendungen.

2.1 VTOL-Flugsystemkonzepte

Betrachtet man die zum Einsatz kommenden Flugsystem-Konfigurationen, so überwiegt der Typ der Multi-Rotor-Systeme, da diese einfache Struktur- und Flugregelungseigenschaften mit der Fähigkeit des senkrechten Starten und Landens verbinden. Nachteil dieser Systeme ist die geringe Reichweite sowie die stark begrenzte Nutzlastkapazität. Letztere ist vor allem auf die schlechte Energieeffizienz des Multi-Rotor-Konzepts zurückzuführen, da der gesamte Auftrieb allein durch den Motorschub erzeugt wird. Aufgrund der Systemauslegung auf den Schwebeflug weisen Multikopter schlechte Horizontalflugeigenschaften auf und erreichen somit keine hohen Fluggeschwindigkeiten. Weitere Vorteile der Systeme sind die Möglichkeit einer kompakten wie auch insgesamt kleinen Bauform sowie die gute Robustheit in Bezug auf äußere Einflüsse.

Neben Multi-Rotor-Systemen erfolgt auch die Nutzung unbemannter Luftschiffe für luftgestützte Untersuchungen (INOUE *et al.* 2000, RUBIO *et al.* 2005). Die wesentlichen Vorteile dieser Systeme sind die hohe Nutzlastkapazität sowie die hervorragende Energieeffizienz. Bei Luftschiffen auf Basis von *Leichter-als-Luft*-Technologien wird der gesamte Auftrieb durch das Füllmedium erzeugt, sodass die Antriebsenergie ausschließlich für Horizontalbewegungen sowie die Höhenhaltung zur Verfügung steht. Großer Nachteil der Systeme ist die bauartbedingte und für die Auftriebserzeugung notwendige Größe, sowie die starke Anfälligkeit auf wetterbedingte Störungen, insbesondere die größenbedingte Windanfälligkeit.

Hybride Flugplattformkonfigurationen (CHOI *et al.* 2010, MURAOKA *et al.* 2009), im konkreten Beispiel in Form eines Kippflügel-RPA (OSTERMANN *et al.* 2010), finden bislang noch keine breite Verwendung in der Umsetzung als unbemannte Systeme. Hybridsysteme zeigen durch Kombination spezifischer Charakteristika herkömmlicher Flugplattformkonzepte – wie etwa der beiden voran genannten Bauformen – erweiterte Systemeigenschaften auf. Eine solche Kombination ermöglicht ein erweitertes Einsatzspektrum, wenngleich dieses jedoch mit Einschränkungen einhergeht und einen im Idealfall bestmöglichen Kompromiss bedeutet. In Bezug auf die Kriterien hinsichtlich Agraranwendungen zeichnen sich Kippflügel-Systeme durch eine hohe Reichweite in Verbindung mit einer Auslegung auf hohe Fluggeschwindigkeiten auf. Des Weiteren zeigt diese RPA-Konfiguration gute Flugeigenschaften sowohl im Schwebeflug wie auch im Horizontalflug, wie auch hinsichtlich einer Wetterrobustheit. Die angesprochenen Kompromisse zeigen sich bei der Betrachtung der Nutzlastkapazität und der Energieeffizienz. Gerade letztere variiert je nach geflogener Mission in Abhängigkeit der Anteile des energetisch ungünstigen Schwebefluges am Gesamtflugplan.

Eine vergleichende Übersicht mit den zusammengefassten Bewertungskriterien der drei beschriebenen Flugplattformkonfigurationen, Multi-Rotor, Luftschiff und Kippflügel, ist in **Tabelle 2** gezeigt.

Tabelle 2: Vergleich VTOL-fähiger Fluggerätekonzeppte anhand agrarspezifischer Anwendungskriterien

	MULTI-ROTOR	LUFTSCHIFF	KIPPFLÜGEL
Reichweite	-	+	+
Nutzlastkapazität	-	+	o
Schwebeflug	+	+	+
Horizontalflug	-	o	+
Energieeffizienz	-	+	o
Fluggeschwindigkeit	o	-	+
Größe	+	-	o
Wetterrobustheit	+	-	+

Legende: + gut, o befriedigend, - schlecht

Bezugnehmend auf die Anforderungen hinsichtlich Agraranwendungen und speziell der Motivation einer großflächigen Erfassung ist ersichtlich, dass Multi-Rotor-Systeme durch Kombination einer geringen, stark nutzlastabhängigen Reichweite und einer begrenzten Fluggeschwindigkeit eine effiziente Erfassung von Ackerflächen der aufgezeigten Größenordnungen nicht erlauben. Zwar ist grundsätzlich eine solche Erfassung mittels Luftschiff-Einsatz möglich, jedoch ermöglichen diese Systeme durch die geringe Fluggeschwindigkeit nur eine sehr zeitintensive Datenerfassung und zeigen zudem aufgrund der Größe und Wetteranfälligkeit keine breite Alltagstauglichkeit. Genau hier setzt die Idee einer Nutzung von Kippflügel-Systemen an, die dank ihrer VTOL-Fähigkeit ohne eine Start- beziehungsweise Landebahn auskommen, gleichzeitig aber durch die Vorzüge einer Starrflügler-Konfiguration über ein sehr gutes Struktur-Nutzlast-Verhältnis sowie eine große Reichweite verfügen. Im Folgenden werden daher anhand des Beispiels des Kippflügel-Konzeptes die Vorteile eines solchen hybriden RPA-Systems gegenüber herkömmlichen Plattformen aufgezeigt und eine mögliche Realisierung eines Kippflügel-RPA sowie dessen Anwendungspotential vorgestellt.

3 Kippflügel-Flugsystem

3.1 Konzept

Vor dem Hintergrund der gegenwärtigen Situation und den zuvor genannten Anforderungen erweist sich ein Kippflügel-Flugsystem im Hinblick auf den Einsatz im Agrarbereich als ideale Trägerplattform für verschiedene Sensorapplikationen. Im Folgenden wird daher das zugrunde liegende Konzept dieser Konfiguration noch einmal näher betrachtet. Kippflügler gehören zur Gattung der Wandelflugzeuge (VON GERSDORFF *et al.* 1982). Diese vereinen die Vorzüge konventioneller Flächenflugzeugen, auch als Starrflügler bezeichnet, mit denen von Drehflüglern in einem System und haben die Fähigkeit während des Flugs zwischen beiden zu wechseln. So können die jeweils positiven Eigenschaften der grundsätzlich unterschiedlichen Flugplattformkonfigurationen be-

darfsorientiert eingesetzt werden. Starrflügler zeichnen sich durch einen energie- und reichweiteneffizienten Flugbetrieb über große Distanzen aus, erfordern jedoch stets eine gewisse Mindestgeschwindigkeit, unterhalb der an den Tragflächen nicht mehr ausreichend Auftrieb generiert werden kann. Demnach sind sie grundsätzlich nicht in der Lage zu schweben. Drehflügler hingegen weisen aufgrund ihrer Rotoren sehr gute Schwebeflugeigenschaften sowie das Vermögen senkrechter Starts und Landungen auf, da der Auftrieb bei dieser Konfiguration in Abhängigkeit der Blattumlaufgeschwindigkeit und -anstellwinkel nur geringfügig von der Eigengeschwindigkeit des Fluggeräts abhängt (OSTERMANN *et al.* 2010).

Kippflügel-Flugzeuge verfügen über einen, um seine Querachse kippbaren Tragflügel. Durch kontinuierliches Drehen der Flächen von der Horizontal- in die Vertikalebene kann die Flugplattform von der Flächenflug- in die Drehflüglerkonfiguration verwandelt werden, wie in **Abbildung 2** schematisch dargestellt ist. Dieser Vorgang beziehungsweise der Wechsel zwischen den Flugzustandsphasen wird als Transition bezeichnet.

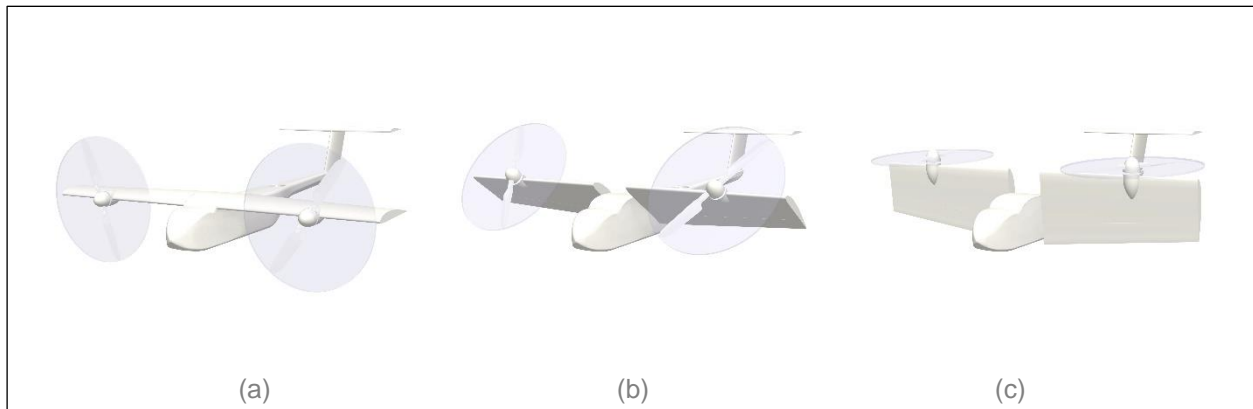


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Kippflügel-Prinzips

3.2 System

Am Institut für Flugsystemdynamik der RWTH Aachen wurde ein solches Kippflügel-Flugzeug im Rahmen des zwischen 2010 und 2013 durch die europäische Union sowie das Bundesland NRW geförderten Projekts *AVIGLE* entwickelt (ROHDE *et al.* 2010). Das Flugzeug (**Abbildung 3**) verfügt über die genannten Wandlungsfähigkeiten und ist als flexibel einsetzbare, multifunktionale Sensorplattform für den Einsatz in Katastrophengebieten konzipiert.



Abbildung 3: Kippflügel-RPA im Transitionsflugmodus

Als maßgebliche Faktoren standen bei der Entwicklung die Forderung nach einer Senkrechtstart- und Landefähigkeit im Vordergrund, um unabhängig von einer Bodeninfrastruktur betrieben werden zu können. Des Weiteren sollte das Flugzeug das Potenzial aufweisen längere Strecken möglichst effizient und in kurzer Zeit zu überwinden, da Katastrophengebiete in der Regel schlecht zugänglich sind und der Punkt des Interesses sich nicht in unmittelbarer Nähe zu einem Startplatz befindet. Schließlich sollte die fliegende Plattform im Zielgebiet je nach eingesetzter Sensorik mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bis hin zum Schwebeflug betrieben werden können. Diese Attribute lassen sich auch uneingeschränkt auf Anwendungen im Agrarbereich übertragen. Einige Spezifikationsdaten des Kippflüglers sind in **Tabelle 3** aufgeführt.

Tabelle 3: Auszug der technischen Daten des Kippflügel-RPA

PARAMETER	WERT
Spannweite	2,0 m
Rumpflänge	2,0 m
MTOM	12,5 kg
Nutzlastkapazität	1,5 kg
Maximalgeschwindigkeit	40 m/s
Minimalgeschwindigkeit	0 m/s
Reichweite	60 km

(*MTOM: Maximum Take-Off Mass, max. Gesamtabfluggewicht*)

Das Kippflügel-Flugzeug wird vollelektrisch mit Lithium-Polymer Akkus betrieben. Als Antriebe kommen zwei leistungsstarke bürstenlose Motoren zum Einsatz. Aufgrund der großen Propellerdurchmesser bleiben die Kreisflächenbelastungen im Vertikalflug auf einem moderaten Niveau. Die Luftschraubenblätter weisen überdies eine hybride Geometrie auf, um sowohl im Horizontal- als auch im Vertikalflug eine effiziente Schuberzeugung zu gewährleisten. Da sich die Anforderungen für beide Flugzustände jedoch

sehr unterschiedlich gestalten, liegt der Antriebsauslegung der bereits aufgeführte Aspekt der Kompromissfindung zugrunde.

In **Abbildung 4** sind die Steuerelemente des Systems dargestellt. Während des Horizontalflugs werden – wie bei Flächenflugzeugen üblich – Quer-, Höhen- und Seitenrudder zur Roll-, Nick- und Giersteuerung verwendet. Im Vertikalflug werden infolge der fehlenden Anströmung die Ruder am Heckausleger jedoch ineffektiv. Die Querruder hingegen können weiterhin verwendet werden, da sie sich im Nachlauf der Antriebspropeller befinden und kontinuierlich umströmt werden. Aufgrund ihrer geänderten Lage und Orientierung erzeugen sie allerdings ein Giermoment, während die Rollsteuerung nun durch unterschiedliche Drehzahlvorgaben an die Antriebe erfolgt. In ähnlicher Weise wird auch das Nickmoment erzeugt. Dafür ist im Heckausleger ein zusätzlicher Steuerimpeller integriert, der zur Steuerung und Stabilisierung der Nicklage beiträgt. Ein weiteres nicht zu vernachlässigendes Steuerelement in der Transition ist der kippbare Tragflügel, der die Orientierung der Antriebe und die Querruderwirkungen beeinflusst.

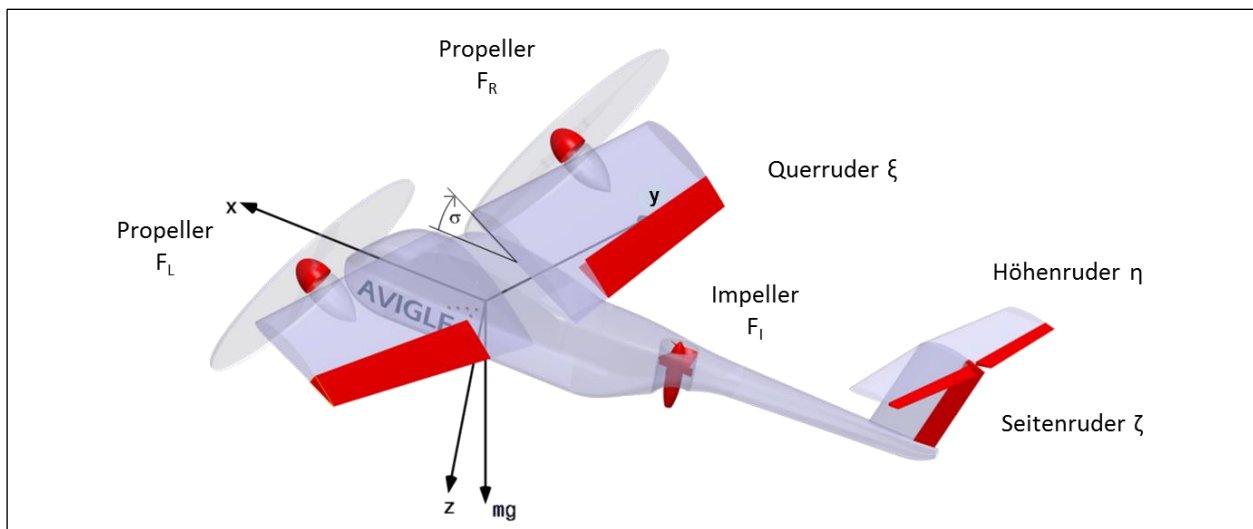


Abbildung 4: Kippflügler-Steuerelemente (OSTERMANN *et al.* 2012)

Für die automatisierte Flugführung ist der Kippflügler mit einem leistungsfähigen Bordrechnersystem sowie Sensoren zur Bestimmung der Flugzustandsdaten und zur Navigation ausgestattet. Das implementierte Regelungssystem übernimmt auf Basis dieser Informationen sämtliche Aufgaben zur Stabilisierung und Steuerung. Eine Besonderheit ist in diesem Zusammenhang, dass das Fluggerät auch an jedem Punkt der Transition beziehungsweise mit teilweise gekipptem Tragflügel stationär betrieben werden kann. Somit besteht die Möglichkeit den gesamten Geschwindigkeitsbereich zwischen aerodynamisch getragenen Horizontalflug und Schwebeflug vollständig zu erschließen. Ferner kann diese Fähigkeit dazu verwendet werden auf besondere Wind- und Umwelteinflüsse situationsbedingt zu reagieren und einen kontinuierlichen Messbetrieb sicherzustellen.

Die Flugplattform verfügt über zwei Nutzlastsektionen zur Mitnahme anwendungsspezifischer Sensorik. Eine kleine Sektion befindet sich in der Bugspitze, die ein uneingeschränktes Sichtfeld gestattet. Ferner können durch einen dort angebauten Nasenmast Untersuchungen in der ungestörten Atmosphäre vor dem Flugzeug durchgeführt werden, beispielsweise Aerosolmessungen. Die zweite, größere Sektion hat die Maße 0,18 m x 0,18 m x 0,5 m und befindet sich im mittleren Rumpfbereich. Diese bietet durch eine Öffnung in der Unterschale ein freies Sichtfeld nach unten mit einem Öffnungswinkel von 180° in longitudinaler und 90° in lateraler Richtung (**Abbildung 5**).



Abbildung 5: Kippflügel-RPA

4 Diskussion

Die Nutzung von RPA bedient sich aktuell vornehmlich des Einsatzes von Multi-Rotor-Systemen. Gerade im Hinblick auf die Anforderungen agrartechnischer Anwendungen bedeutet die geringe Reichweite dieser Systeme jedoch eine starke Limitierung. Als mögliche Alternative ist daher hier die Realisierung eines unbemannten Flugsystems in Kippflügel-Konfiguration vorgestellt, welches die Vorteile schwebefähiger Flugplattformen mit den energieeffizienten Streckenflugeigenschaften von Starrflüglern vereint. Durch die hier realisierte Systemgröße mit einer Spannweite von 2 Metern und einem Abfluggewicht von 12,5 Kilogramm kann bereits ein breites Applikationsspektrum abgedeckt werden: Das Kippflügel-RPA weist mit 60 Kilometern und 1,5 kg eine Reichweiten-Nutzlast-Kombination auf, welche – in Abhängigkeit der Mess-Sensorik – die Erfassung großflächiger Bereiche ermöglicht. Somit ist eine klare Eignung des Kippflügel-Systems für Anwendungen im Agrarbereich aufzeigt. Als Ausblick sind zudem zukünftige Modifizierungen des Systems hinsichtlich Plattformgröße angedacht, welche eine weitere Optimierung der Nutzlastintegration sowie effektiven Untersuchungszeit erlauben.

Literaturverzeichnis

- CHOI S.W., KANG Y., CHANG S., KOO S., KIM J.M. (2010):** Development and conversion flight test of a small tiltrotor unmanned aerial vehicle. *Journal of Aircraft*, 47(2), 730-732
- I.M.A - INFORMATION.MEDIEN.AGRAR E.V. (2013):** Informationen zur deutschen Landwirtschaft: Zahlen, Daten, Fakten. Berlin, 2013.
http://information-medien-agrar.de/webshop/mediafiles//PDF/104-117_info-landwirtschaft.pdf
- INOUE Y., MORINAGA S., TOMITA A. (2000):** A blimp-based remote sensing system for low-altitude monitoring of plant variables: a preliminary experiment for agricultural and ecological applications. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 379-385
- MURAOKA K., OKADA N., KUBO D. (2009):** Quad tilt wing VTOL UAV: aerodynamic characteristics and prototype flight test. *AIAA Infotech@ Aerospace Conference and AIAA Unmanned Unlimited Conference*
- 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 Arch. Photogrammetry and Remote Sensing Spatial Information*, 37, 1193-1198
- OSTERMANN T., HOLSTEN J., MOORMANN D. (2010):** Entwicklung eines autonom operierenden Tiltwing-UAV für den Einsatz in selbstorganisierenden Drohnenschwärmen. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010*
- OSTERMANN T., HOLSTEN J., DOBREV Y., MOORMANN D. (2012):** Control concept of a tiltwing uav during low speed manoeuvring. *Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences: ICAS 2012, Brisbane, Australia*
- ROHDE S., GODDEMEIER N., WIETFELD C., STEINICKE F., HINRICHS K., OSTERMANN T., MOORMANN D. (2010):** AVIGLE: a system of systems concept for an avionic digital service platform based on micro unmanned aerial vehicles. In *Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 459-466). IEEE
- RUBIO J.M., LAHOZ J.G., AGUILERA D.G., CODES J.F. (2005):** Imap3d: low-cost photogrammetry for cultural heritage. In *Proceedings of the CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy. Camera and Imaging Products Association*
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2011):** Landwirtschaft auf einen Blick. Wiesbaden, 2011.
<https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Querschnitt/BroschuereLandwirtschaftBlick0030005119004.pdf>
- THOMAS III L.P. (1959):** A Flight Study of the Conversion Maneuver of a Tilt-wing VTOL Aircraft.
- TORRES-SÁNCHEZ J., LÓPEZ-GRANADOS F., DE CASTRO A.I., PEÑA-BARRAGÁN J.M. (2013):** Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *PLoS One*, 8(3), e58210
- VON BUEREN S.K., BURKART A., HUENI A., RASCHER U., TUOHY M.P., YULE I.J. (2015):** Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. *Biogeosciences*, 12, 163-175
- VON GERSDORFF K., KNOBLING K. (1982):** Hubschrauber und Tragschrauber - Die deutsche Luftfahrt Bd. 3. München: Bernard & Graefe Verlag, 1982. ISBN 3-7637-5273-0

Photogrammetrische Vermessung landwirtschaftlicher Nutzflächen aus der Luft unter Nutzung eines Low Cost Differenz GPS Systems zur Aufdeckung archäologischer Fundstellen

Photogrammetric survey of agricultural land from the air using a low cost differential GPS system to detect archaeological sites

Heinrich Warmers¹, Gerson H. Jeute², Martin von Kameke³

¹ Hochschule Bremen, Institut für Aerospace Technologie, Flughafenallee 10, D-28199 Bremen,

² Universität Bremen, Fachbereich 8 Institut für Geschichtswissenschaften Abteilung Ur- und Frühgeschichte, Postfach 330440, D-28334 Bremen

³ Luftfotos24, Hainmühlen 3, D-27624 Ringstedt

alle Autoren sind Gründungsmitglieder des Hanseatischen AKAModell e.V., Weyhe
E-Mail: hwarmers@hs-bremen.de, ghjeute@uni-bremen.de, info@luftfotos24.de

Zusammenfassung: Die Topologienbestimmung landwirtschaftlicher Nutzflächen mit einer Auflösung im Zentimeterbereich mittels UAS bei einer Flughöhe von 95 m unter Verwendung einer hochauflösenden Systemkamera ist ein kostengünstiges und zeitsparendes Verfahren. Hierzu wurde ein zweimotoriges Flächenmodellflugzeug so umgebaut, dass es eine lichtstarke Systemkamera vibrationsarm gelagert trägt und durch Ausrüstung eines effizienten Antriebssystems eine Flugzeit von bis zu 30 Minuten erreicht. Als Autopilotensystem wurden die Ergebnisse des Paparazzi-Projektes genutzt, das in Bremen in den Jahren 2008–2012 um zusätzliche Komponenten erweitert wurde. Die zu untersuchende Fläche wurde im Juni 2014 mit Fixpunkten (Schilder) ausgestattet, deren Koordinaten mittels eines präzisen L1-GPS-Empfängers und dessen Höhe mit einem Nivelliergerät vermessen wurde. Die mit Überdeckung aufgenommenen Fotos wurden mit der Pix4Dmapper-Software verrechnet, und die Auswertung ergab ein 3D-Modell mit einer Auflösung von 2 cm.

Deskriptoren: UAV; UAS; GPS; Paparazzi Autopiloten; photogrammetrische Vermessung archäologischer Fundstellen; Verkehrsflughafen

Abstract: *The topology determination of agricultural land with a resolution in centimeter range by UAS at an altitude of 95 m using a high-resolution camera system is a cost-effective and time-saving method. For this purpose, a twin-engine fixed-wing model aircraft was modified, so that it can carry a bright system camera. Vibrations are damped by a special bearing system. An efficient drive system achieves a flight time of up to*

30 minutes. The results of the paparazzi project were used as autopilot system, that has been extended in Bremen in the years 2008-2012 with additional components.

In June 2014 fixed points (signs) were deployed on a test surface, their coordinates were measured by a precision L1 GPS receiver and its height with a leveler. The overlapping photos were processed by the Pix4Dmapper software and the evaluation showed a 3D model with a 2 cm resolution.

Keywords: UAV; UAS; GPS; Paparazzi autopilots; photogrammetric surveying archaeological sites; commercial airport

1 Einleitung

An der Hochschule Bremen wird seit mehr als einem Jahrzehnt auf dem Gebiet unbemannter Luftfahrtsysteme in den Bereichen Fluggeräte, Flugregelung, Telemetrie, inertielle Messsysteme, Elektronik, GPS-Navigation, Software und deren Anwendung gearbeitet. Bisher standen Mikrofluggeräte zur Videoüberwachung der 200 g-Klasse und Flächenfluggeräte für die Klimaforschung im Vordergrund. Für die Bereiche Autopiloten, Bodenstation und Flugplanung werden die Ergebnisse des Paparazzi-Projektes (ENAC Toulouse) genutzt. In unmittelbarer Nähe des Bremer Verkehrsflughafens befindet sich eine archäologische Fundstelle auf einer landwirtschaftlich genutzten Fläche. Zum Zeitpunkt der Vermessung erfolgte eine archäologische Grabung und Prospektion (DFG-Projekt SPP 1630, Teilprojekt „Häfen als Siedlungsfaktoren zwischen Römischer Kaiserzeit und Mittelalter im Bremer Becken“). Es entstand der Wunsch, für eine 17 ha große Fläche ein 3D-Modell der Landschaft mit genauer Höhenmodellierung zu erstellen, um Bodensenkungen zu erkennen und so auf Reste von Holzbebauungen zu schließen.

Das Paparazzi-Projekt (PAPARAZZI 2016) wurde von Antoine Drouin und Pascal Brisset im Jahr 2003 als Privatprojekt gegründet und ab 2004 als Dienstaufgabe weitergeführt und verfolgt folgende Ziele:

- Entwicklung eines robusten, sicheren Gesamtsystems bestehend aus Hard- und Software zum automatischen Flug von Mikroflugzeugen zur Video-Überwachung und Messdatengewinnung,
- Eignung für Flächenflugzeuge und Multikopter,
- Teilnahme an internationalen Flugwettbewerben mit Mikrofluggeräten anlässlich der IMAV- und EMAV- Konferenzen,
- kostenfreie Bereitstellung aller Dokumentationen, Software-Werkzeuge, Quelltexte und Pläne und ihre Verteilung über das Internet (Das Projekt wird von den Urhebern unter die GPL gestellt) und
- ausschließliche Nutzung freier Software: Linux, OCaml, GCC; keine Unterstützung von Microsoft Betriebssystemen.

In Bremen wurden in den letzten Jahren folgende Beiträge geleistet:

- Entwicklung von mit Paparazzi automatisierten Mikroflugeräten der 200g-Klasse (FROMMANN *et al.* 2008) (WARMERS *et al.* 2013),
- Entwicklung von Autopiloten mit inertialen Messsystemen (WARMERS *et al.* 2013),
- Integration eines Komplementärfilters zur Lagemessung in Flächenflugeräten,
- Integration eines OpenLog-Massenspeichers und
- Ausrüstung, Erprobung und Einsatz von Flugeräten bei meteorologischen Messkampagnen (**Abbildung 3** und **4**) (WARMERS *et al.* 2013).



Abbildung 1: MAV Wanze, 206 g, 100 mm
HBMIN Autopilot von 2013

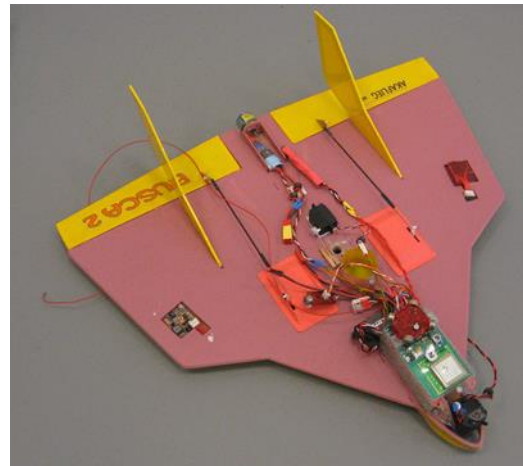


Abbildung 2: MAV BUSCA2, 400 mm
Spannweite, 240 g, Tiny Autopilot
von 2007



Abbildung 3: Funjet zur Messung von Luftdruck, Temperatur und Luftfeuchte 900 g, 80 cm Spannweite, Flugzeit 45 Minuten, der Funjet wurde durch (REUDER *et al.* 2008) als SUMO eingeführt.



Abbildung 4: HB-Kopter zur Messung der Windgeschwindigkeit, des Luftdrucks und der Temperatur, 1200 g, 13 Minuten Flugzeit HBMINI Autopilot

2 Das Fluggerät und seine Modifikationen

Bei der Suche nach einem geeigneten Fluggerät wurde auf die guten Erfahrungen mit einem robusten, leichten, preiswerten und gutmütigen, auch für Anfänger beherrschbaren Flugmodell Twinstar II (Hersteller: Mutiplex) zurückgegriffen. Mit diesem haben wir die ersten automatisierten Flüge im Jahr 2007 durchgeführt. Das Startgewicht beträgt 1553 g, die Spannweite 1,42 m und die Flugzeit 15 Minuten. Der Hersteller hatte das CAD-Modell zur Verfügung gestellt. Dieses ermöglichte es, die flugmechanischen Eigenschaften zu bestimmen und ein vollständiges Streckenmodell der Flugregelkreise zu ermitteln (DEMIREZ 2006). Das Flugmodell besteht aus einem schlagzähen und leichten Schaumstoff, expandiertem Polypropylen (EPP) und einem Kohlerohr als Tragflächenholm. Diese Kunststoffbauweise hat sich bei dem zum Fotoflug umgebauten Modell (**Abbildung 5**) bewährt, da es bei Berührungen mit Pflanzen und Bodenfurchen nicht zu Schäden gekommen ist.



Abbildung 5: Umgerüstetes Fluggerät mit inertialer Lagemessung, verbessertem Antrieb und montierter Fotokamera, Startmasse 2080 g, Flugzeit 30 Minuten

Als Antrieb des zweimotorigen Modells dienen zunächst mit Ferritmagneten ausgestattete Bürsten-Gleichstrommotoren (Speed 400, 73 g) und 6 x 3 Zoll direkt angetriebene Kunststoffpropeller. Der Wirkungsgrad eines derartigen Antriebs liegt für den Motor bei etwa 0,6 und für die Luftschaube ebenfalls bei etwa 0,6. Mit einem resultierenden Wirkungsgrad von 0,36 lassen sich keine langen Flugzeiten erreichen. Außerdem war die Antriebsleistung zu klein, um bei einer Zuladung von 430 g für die Kamera und die Haltevorrichtung bei erhöhtem Wind (>12 m/s) zu fliegen und sicher zu starten. Die Lösung dieser Probleme bestand darin, den Antrieb mit Seltenen Erden Magneten ausgestatteten Drehstrommotoren (83 g, Roxy 2838) und 10 x 4,7 Zoll Luftschauben aus CFK zu ersetzen. Die maximale Abgabeleistung der Motoren erhöhte sich von ca. 66 W auf 230 W je Motor. Damit war auch bei erhöhter Zuladung und starkem Wind ein sicherer

Flugbetrieb zu erwarten. Der Antriebsstrangwirkungsgrad stieg auf ca. 0,6. Weiter wurde der Nickel-Metall-Hydrid Akkumulator 8,4 V, 3700 mAh, 30 Wh, 484 g durch einen Lithium-Polymer-Akkumulator 11,1 V, 5000 mAh, 55,5 Wh, 398 g ersetzt. Diese Akkus haben einen Handhabungsnachteil. Bei tiefen Temperaturen um 0°C geben sie kaum Ladung ab. Sie werden deshalb, wenn nötig, auf 20°C vorgewärmt. **Abbildung 6** zeigt ein Blockschaltbild des Fluggerätes und die Kosten der einzelnen Komponenten. Der Massenspeicher OpenLog wurde eingeführt, um die von Fluggerät zur Bodenstation gesendeten Telemetriedaten, hierzu zählen auch Fotonummern, deren Koordinaten und Lageinformationen, zu speichern und gegen Telemetrierstörungen zu sichern. Die für die Flugführung notwendigen Inertialsensoren sind auf einer separaten kleinen Leiterplatte angeordnet. Der Luftdrucksensor misst mit 24 Bit Auflösung. Dieses ermöglicht eine Höhenbestimmung im Dezimeterbereich.

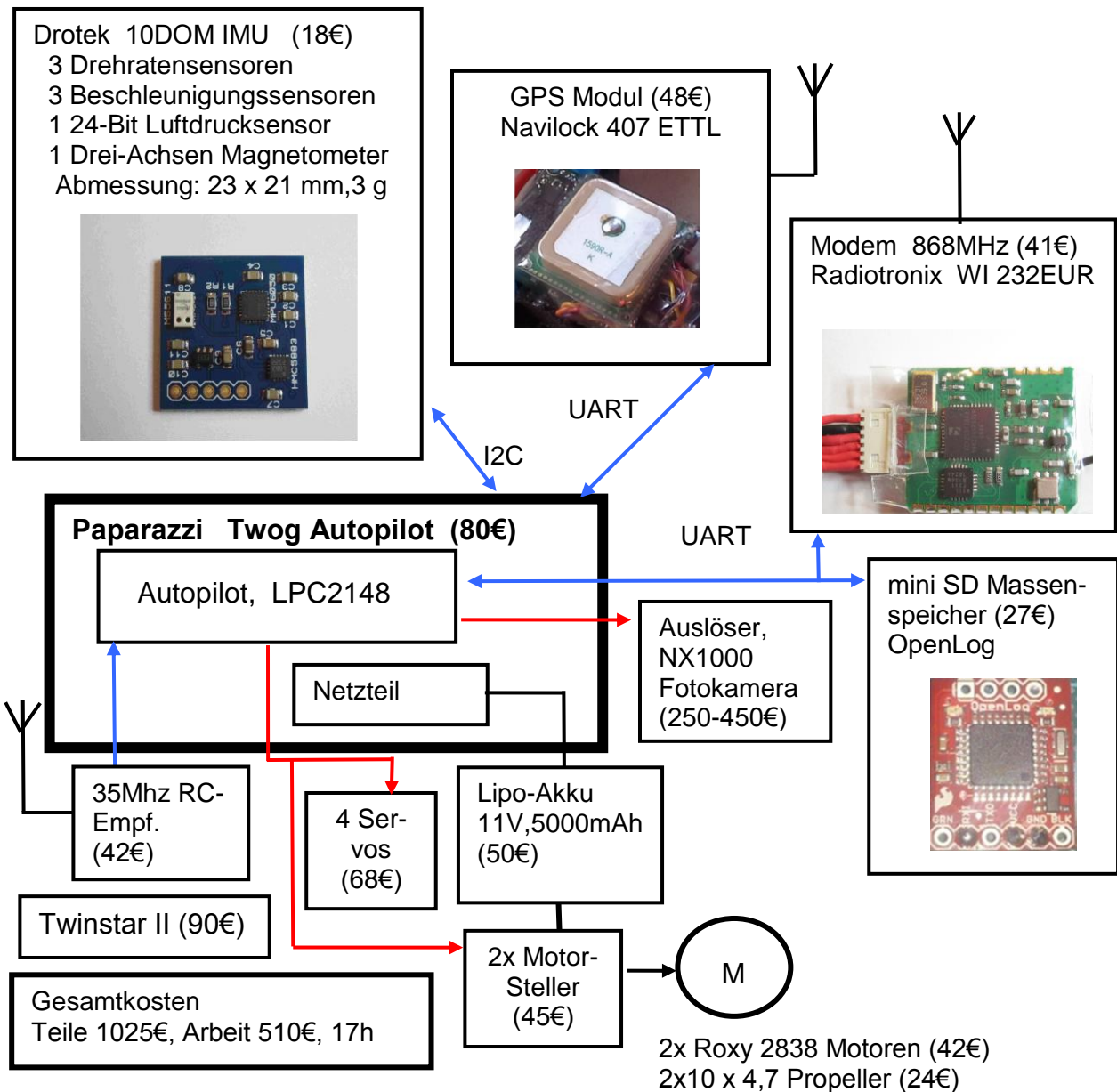


Abbildung 6: Blockschaltbild, Einzelkosten und Gesamtkosten für das Fluggerät

Da wir uns für eine Systemkamera Samsung NX1000 bzw. NX2000 (400 g inkl. Objektiv) mit einem 23,5 mm * 15,7 mm großen CMOS-Bildsensorchip entschieden haben, bestand das Problem darin, diese in den Rumpf zu integrieren. Der Rumpfboden wurde mit einer Öffnung versehen und die Rumpfsseitenwände verjüngt und anschließend mit Holmen verstärkt. Um die durch die rotierenden Massen des Antriebssystems entstehenden Vibrationen ausreichend zu dämpfen, wurden zwei konstruktive Maßnahmen eingeführt. Erstens wurden die Motoren durch Gummilager befestigt. Zweitens wurde die Befestigungsplatte der Kamera über Gummidämpfer im Rumpf eingehängt. Weiter wurde die Verschlusszeit der Kamera fest auf 2 ms eingestellt und eine Blendenautomatik genutzt. Durch diese Maßnahmen wurden scharfe Fotos erreicht.

3 GPS-Empfangssysteme

Die Entwicklung von preiswerten GPS-Empfängern hat im letzten Jahrzehnt eine deutliche Genauigkeitssteigerung erreicht. Dieses wird durch die von uns verwendeten Empfänger der Firma u-blox demonstriert. Das von uns 2006 eingesetzte Empfangsmodul SAM-LS erreichte einen Positionsfehler 2D von 5-15 m (50% der Messwerte liegen innerhalb dieser Fehlerschranke). Das LEA5-Modul, eingesetzt im Jahr 2008, erreichte Positionsfehler 2D im Bereich von 2-5 m. Das derzeit aktuelle Modul NEO8M erreicht unter guten Bedingungen einen 2D Fehler von 0,56 m. Der in diesem Projekt zur Vermessung der Bodenreferenzpunkte verwendete Präzisions-Empfänger NEO7P konnte den Fehler -in Verbindung mit einer durch zwei Einspeisepunkte besonders phasenlineare aktiven Antenne der Firma Tallysman- unter guten Bedingungen auf 27 cm 2D und 60 cm 3D reduzieren. Dieses wurde durch die Nutzung eines nunmehr über Fernmeldesatelliten ausgestrahlten SBAS-Dienstes und eines auf Stationärbetrieb optimierten Kalmanfilters sowie eines neu implementierten PPP-Verfahrens erreicht. Eine weitere Steigerung der Präzision ist durch Differenz-GPS-Verfahren möglich. Erste Untersuchungen aus dem Jahr 2009 unter Nutzung der SAM-LS Module und der Open Source Software RTKLIB (TAKASU 2009) erreichten im dynamischen Rover-Betrieb einen Fehler von unter einem Meter (MEYER 2009). Unter Nutzung der aktuellen RTKLIB-Software (TAKASU 2012), eines Laptops und eines für Forschungszwecke kostenfreien Ntrip-Dienstes (Standard for Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) des Bundesamtes für Vermessungswesen (BUNDESAMT 2016) und der Empfangsstelle Borkum (154 km vom Fluggebiet entfernt) konnten 2D-Fehler von 3 cm und ein 3D-Fehler von 10 cm bei einer Auflösung im mm-Bereich im stationären Messbetrieb mit dem Präzisions-Empfänger NEO7P sowie bei sehr guten Bedingungen (offener Himmel, >9 empfangene Satelliten, freies Feld, trockener Boden) erreicht werden. Das Einrasten der D-GPS-Phasen-Messung benötigt dabei typisch eine Zeit von 10-15 Minuten je Messpunkt. Mittels eines wetterfesten Smartphones wurde ein lokaler WLAN-Accesspoint aufgebaut, um eine Verbindung zum Internet und damit zum Ntrip-Dienst zu erreichen. Die übertragenen Datenmengen und somit die Verbindungskosten sind gering.

Die Phasenmessung wird besonders durch Ausbreitung von Multipfaden der Satellitensignale gestört bzw. verhindert. Hierbei werden Satellitensignale vom Boden und von Gebäuden etc. reflektiert. Bei geostationären Empfangsanlagen werden die reflektierten Satellitensignale oft durch mehrere um das eigentliche Antennenelement angeordnete Hohlleiter kurzgeschlossen (gaud ring). Da uns eine solche Einrichtung nicht zur Verfügung stand, wurde der Öffnungswinkel, unter denen die Satellitensignale ausgewertet wurden, in der RTKLIB-Software auf 45° erhöht. Bis auf nun weniger (1-3) sichtbare Satelliten konnte kein weiterer Nachteil festgestellt werden. Es ist zweckmäßig, die Antenne etwa 2 m über dem Boden anzuordnen. Auch diese Maßnahme ergibt bessere Signale und somit höhere Genauigkeiten. Bezüglich der Höhenbestimmung mit dem GPS bleibt festzustellen, dass die Höhenfehler gegenüber 2D-Koordinaten sich in etwa verdoppeln. Ein Fehler von 56 cm bzw. 14 cm für die Referenzpunkte erschien uns als zu hoch. Deshalb wurden die Höhen der Referenzpunkte optisch unter Nutzung eines Nivelliergeräts und einer Messlatte ermittelt.

4 Flugdurchführung

Vor Flugbeginn im Juni 2014 wurden rote Schilder, die Referenzpunkte, auf dem Gelände gleichmäßig verteilt und am Boden befestigt. Die Mittelpunkte der Schilder wurden mit dem NEO7P GPS Empfänger 3D vermessen. Zusätzlich kamen das Nivelliergerät und die Messlatte zur Anwendung, um die Bodenhöhen der Referenzpunkte möglichst exakt zu bestimmen.

Das Autopilotensystem Paparazzi ist nach Nennung der Kameradaten, Brennweite und Chipfläche eigenständig in der Lage, Flugpfade (Meander) und die Auslösepunkte der Kamera zu bestimmen, wenn zuvor eine Begrenzung des Fluggebietes angegeben wurde, um das Gebiet vollautomatisch abzufliegen. Gestartet und gelandet wird per Funkfernsteuerung wie bei einem RC-Modellflugzeug. Diese Betriebsart ist jederzeit über einen Schalter an der Fernsteuerung wählbar. Die Bodenstation erleichtert die Flugplanung, da die Flugmission durch Setzen von Wegpunkten auf einer Abbildung des Fluggeländes sowie Sicherheitsbegrenzungen definiert wird. Wichtige Meldungen werden durch Klartextansagen abgegeben. Die gesamte Flugmission kann vor Flugdurchführung simuliert werden (**Abbildung 7**). Ein Flug erfordert bei einer ortsfesten Laptop-Bodenstation immer zwei Personen, den RC-Piloten, der jederzeit eingreifen kann und immer Sichtkontakt zum Fluggerät hält, und den Bediener der Bodenstation. Beide müssen sich durch Zurufe verständigen und absprechen.

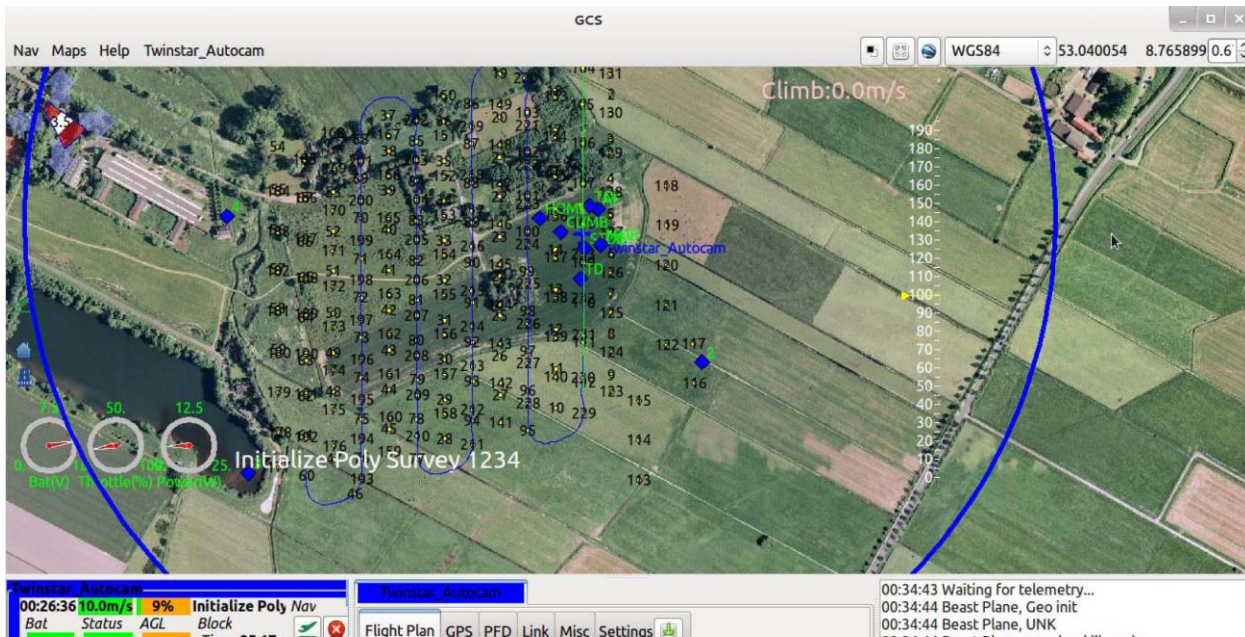


Abbildung 7: Ergebnisse des Simulationslaufes eines vollständigen Fotofluges (Satellitenfotos des Google-Dienstes)

Das Grabungsgelände befindet sich luftfahrtrechtlich in einer sehr exponierten Lage nur ca. 650 m vom Aufsetzpunkt des Verkehrsflughafens Bremen entfernt (**Abbildung 8**). Eine Vorabfrage, ob eine Befliegung in der Flugverbotszone (innerhalb von 1,5 km von der Flugplatzbegrenzung und in der Kontrollzone) genehmigungsfähig sei, ergab die Antwort, dass das der diensthabende Fluglotse im Einzelfall und nach eigenem Ermessen entscheiden würde. Am Flugtag wurde mit dem diensthabenden Fluglotsen in einem Telefongespräch folgendes Verfahren vereinbart: Der Fluglotse erteilt uns telefonisch eine Freigabe zum Starten. Falls wir fliegen und sich Großverkehr zur Landung per Funk anmeldet, müssten wir unverzüglich innerhalb von 1-2 Minuten landen. Dieses würde uns telefonisch mitgeteilt. Diese Verfahrensweise haben wir mehrfach angewendet. Am Nachmittag hatte sich der Flugverkehr so weit beruhigt, dass wir die Fotoflüge mit 277 Fotos erfolgreich abschließen konnten.

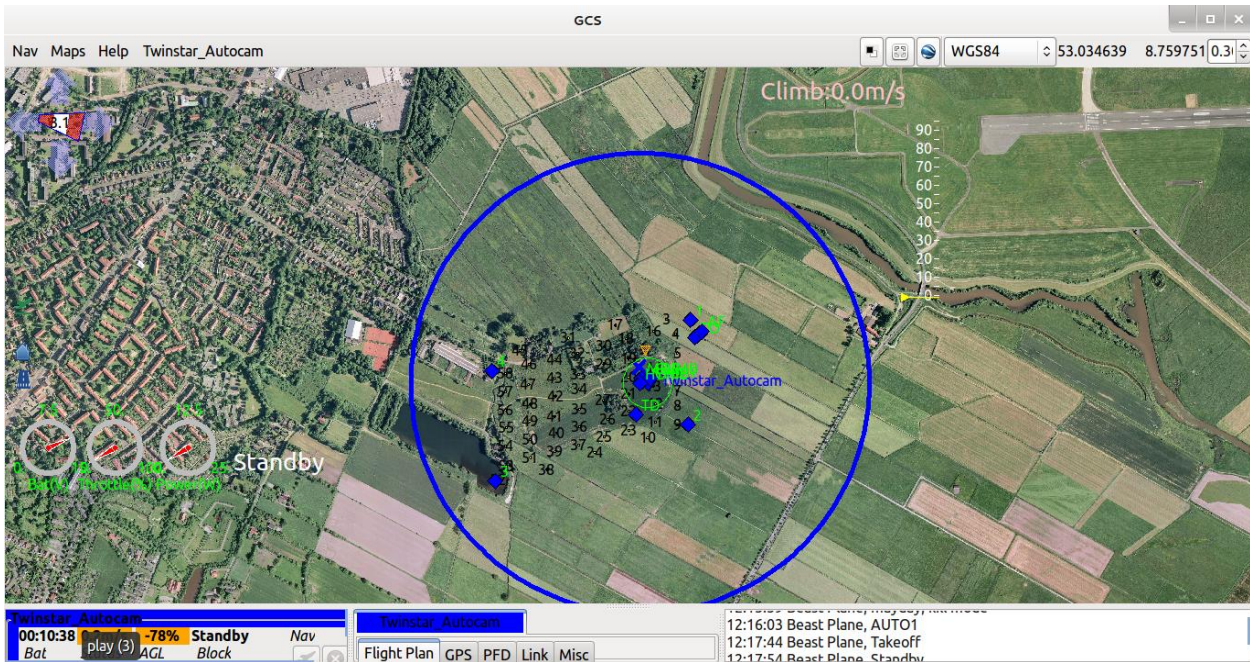


Abbildung 8: Paparazzi-Replay mit den gespeicherten Daten eines abgebrochenen Fotofluges und die exponierte Lage des Untersuchungsgebietes, begrenzt durch die Punkte 1-4 in der Nähe des Verkehrsflughafen Bremen (Satellitenfotos des Google-Dienstes)

5 Flugauswertung

Für die Auswertung der Fotos, der Referenzpunkte und aller 3D Koordinaten wurde die Pix4Dmapper-Software (PIX4D 2014) verwendet. Der erste Lauf zur Ausfilterung von Fehlern benötigte 11 Stunden auf einem Desktop-PC. Die Verrechnung der gefilterten Daten erforderte einen vierstündigen Rechnerlauf auf einem Laptop (2,5 Stunden auf einem Desktop-PC) und lieferte ein hochaufgelöstes 3D-Modell mit 2 cm Auflösung der landwirtschaftlichen Nutzfläche.



Abbildung 9: Referenzpunkt G6 auf Ausschnittvergrößerungen

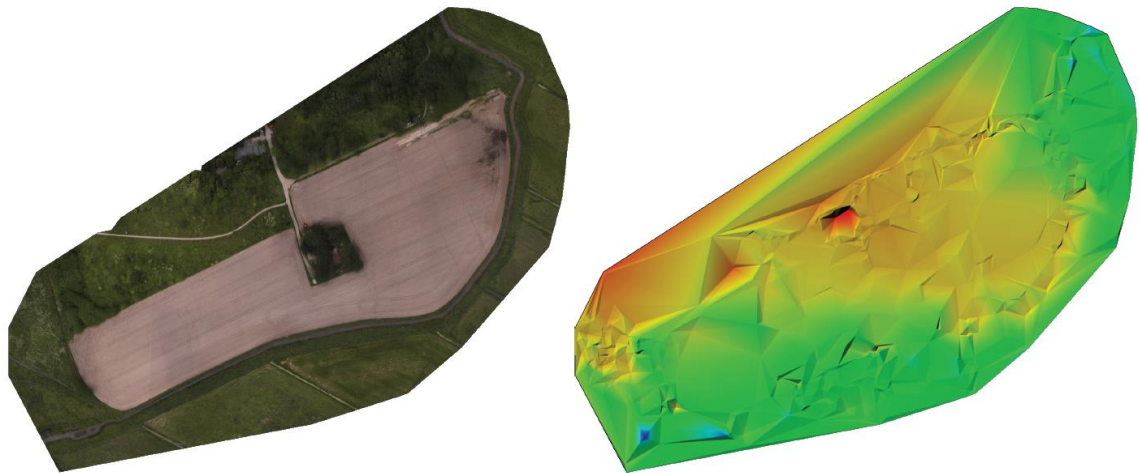


Abbildung 10: Orthomosaik und das digitale Oberflächenmodell vor der Entfernung fehlerhafter Bildpunkte (Desinfektion), erstellt mit Pix4Dmapper

Eine Tabelle, die die Auswertung der Referenzpunkte auflistet, zeigt **Abbildung 11**. Auffällig sind einige Ausreißer, mutmaßliche Ablesefehler im Feld oder Eingabefehler. Weiter haben die X-Koordinaten einen höheren Fehler als die Y-Koordinaten. Der Aufwand, die Höhenkoordinaten mit dem Nivelliergerät zu bestimmen, hat sich gelohnt.

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
G1 (3D)	0.200/ 2.000	-0.039	0.127	0.194	0.409	10 / 10
G3 (3D)	0.200/ 6.000	-0.276	-0.090	0.008	0.015	5 / 5
G4 (3D)	0.200/ 2.000	1.307	0.188	-0.064	0.218	4 / 4
G5 (3D)	0.200/ 2.000	-0.061	0.007	-0.063	0.082	13 / 13
G6 (3D)	0.200/ 2.000	-0.412	0.022	-0.048	0.083	5 / 5
G7 (3D)	0.200/ 6.000	-0.312	0.277	-0.044	0.075	7 / 7
G8 (3D)	0.200/ 6.000	-0.005	-0.105	0.579	0.028	7 / 7
G9 (3D)	0.200/ 2.000	0.043	0.009	-0.067	0.086	5 / 5
G10 (3D)	0.600/ 1.000	-0.915	-0.076	-0.079	0.106	7 / 7
G11 (3D)	0.800/ 2.000	-0.437	-0.091	-0.006	0.143	9 / 9
G12 (3D)	0.200/ 2.000	-0.139	-0.413	-0.162	0.183	9 / 9
G2 (3D)	0.600/ 0.100	0.216	-0.071	0.001	0.056	12 / 12
Mean		-0.085818	-0.017952	0.020716		
Sigma		0.505368	0.166686	0.186355		
RMS Error		0.512603	0.167650	0.187502		

Abbildung 11: Die Daten der verwendeten Referenzpunkte erstellt mit Pix4Dmapper

Ein Beispiel, wie das digitale 3D-Modell ausgewertet werden kann, zeigt **Abbildung 12**. Der Bildpunkt ist auf insgesamt 14 Fotos enthalten. Weiter ist in diesem Bild zu erkennen, dass die übermittelten Koordinaten der Fotos aus dem Fluggerät (blaue Kugeln) nicht immer mit den durch die Software (grüne Kugeln) ermittelten Koordinaten übereinstimmen. Der Einfluss des Windes ist auch festzustellen, da einige Fotos nicht parallel zur Erdoberfläche aufgenommen wurden. Erwartungsgemäß wurden der niedrigste Bo-

denpunkt im Osten des Feldes mit 2,87 m, der höchste auf dem Stichweg zum Gebäude in der Feldmitte mit 5,30 m und der niedrigste Punkt im Entwässerungsgraben mit 1,69 m ermittelt. Zur Auswertung wurden 123 Fotos manuell ausgewählt, von denen 92% zur Erstellung des Modells genutzt und der Rest automatisch verworfen wurden.

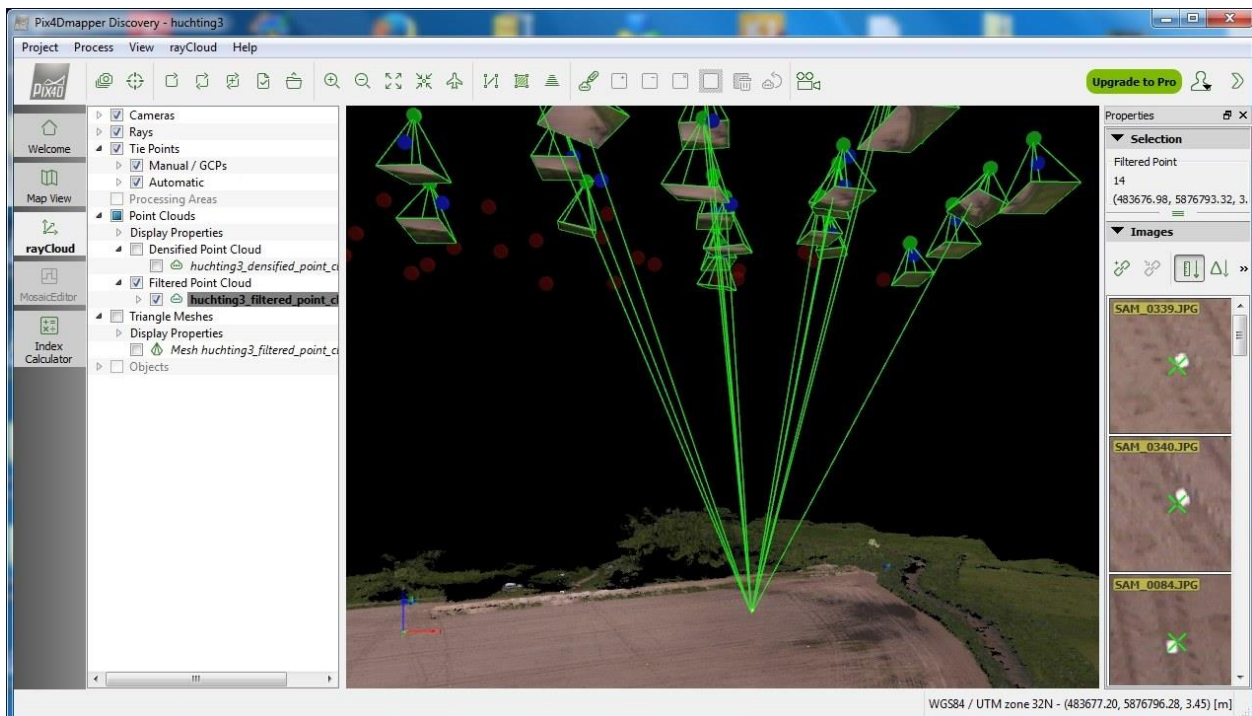


Abbildung 12: Auswertung des 3D-Modells, erstellt mit Pix4Dmapper. Der ausgewählte Punkt hat eine ermittelte Höhe von 3.45 m. Im Hintergrund ist die Stichgrabung zu sehen.

6 Ausblick

Die Erfahrungen in diesem Projekt haben zu Weiterentwicklungen geführt. **Abbildung 13** zeigt die nun verwendete Hardware. Der aerodynamisch hochwertige Nurflügler verfügt über eine Spannweite von 2 m, einer Startmasse von 2600 g, eine maximale Flugzeit von 1,5 Stunden und ist mit zwei Kameras (Tageslicht und Nahes Infrarot) ausgestattet. Die Funkfernsteuerung (Prototyp) übernimmt auch die Aufgaben der Bodenstation und der Telemetiereinrichtungen. Damit ist ein sicherer und gesetzeskonformer Flugbetrieb nur mit den Piloten möglich. Eingesetzt wird das System in der Landwirtstaff für Fotoflüge zur Erstellung von Vegetationsindizes und zur Schadensbegutachtung für versicherte Flächen. Der Multikopter wird für kleinere Flächen eingesetzt.



Abbildung 13: Verbesserte Hardware für Fotoflüge (LUFTFOTOS24 2015)

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Autoren des Paparazzi-Projektes, den Urhebern der genutzten freien Software (für die kostenfreie Bereitstellung der Ergebnisse ihrer Arbeit), dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (für die kostenfreie Bereitstellung der GPS-Korrekturdaten), bei der Flugsicherung Bremen für die kooperative Zusammenarbeit, bei der Hochschule Bremen, dem Forschungscluster Luft- und Raumfahrt, für die finanzielle Förderung dieses Projektes und der Vorläuferprojekte sowie bei der DFG.

Literaturverzeichnis

BUNDESAMT (2016): Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Alle 11, D-60598 Frankfurt am Main, E-Mail: <mailto:euref-ip@bkg.bund.de>
<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/index>

DEMIREZ Y. (2006): Modellierung der Steuerung und Regelung eines Mikroflugzeuges mit Simulink Diplomarbeit, Hochschule Bremen-Fachbereich Elektrotechnik/ Informatik Studiengang Mikrosystemtechnik, September 2006

FROMMANN O., GALKE P., NEITZKE K.P., WARMERS H. (2008): Flight experiments of different MAV concepts with a wingspan of 0.4 m, Proceedings of the EMAV2008, Braunschweig 2008

LUFTFOTOS24 (2015): Hainmühlen 3, D-27624 Ringstedt

MEYER T. (2009): Implementierung, Test und Dokumentation eines Verfahrens zur Erhöhung der Genauigkeit mit zwei GPS-Empfängern, Bachelorthesis, Hochschule Bremen, Fakultät Natur und Technik, August 2009

PAPARAZZI (2016): https://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page, besucht am 29.2.2016

PIX4D (2014): pix4ddmapper-pro, Pix4D SA, EPEL Innovation Park Building D, 1015 Lausanne, Switzerland, <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-pro/>

- REUDER J., BRISSET P., JONASSEN M., MÜLLER M., MAYER S. (2008):** SUMO: A Small Unmanned Meteorological Observer for atmospheric boundary layer research Proceedings 14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing, 23 June to 25 June 2008 *Risø National Laboratory, DTU, Roskilde Denmark*
- TAKASU T. (2009):** RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS, FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, November 2, 2009
- TAKASU T. (2012):** PPP Ambiguity Resolution Implementation in RTKLIB v 2.4.2, PP-RTK & Open Standards Symposium, March 2012, Frankfurt am Main, Germany
- WARMERS H., RIESENER O., NIEMANN C., GALKE P., FISCHER H. (2013):** HB-Mini: A new data acquisition sensor- and autopilot system for atmospheric research and its application on different aircraft, First Conference of the International Society for Atmospheric Research using Remotely-piloted Aircraft, Palma de Mallorca, February 2013

Multikopter und Infrarottechnologie

Multicopter and Infrared Technology

Matthias Oelze, Falk Schmidsberger, Frieder Stolzenburg

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

E-Mail: {moelze,fschmidsberger,fstolzenburg}@hs-harz.de

Zusammenfassung: Infrarottechnologie kann gewinnbringend in diversen Anwendungen wie der Landwirtschaft, aber auch in anderen Bereichen, wie der Archäologie, eingesetzt werden. Das Labor Mobile Systeme der Hochschule Harz beschäftigt sich seit einigen Jahren mit dem Einsatz von Flugrobotern (Multikopter) in verschiedenen Szenarien. Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte wurden unter anderem die Fähigkeiten von Kameras untersucht, die in unterschiedlichen Frequenzbereichen operieren. Neben dem sichtbaren Licht ist dies der Nah- und Ferninfrarotbereich.

Hierbei wurden einerseits mehrere Langzeitversuche zu unterschiedlichen Tages- und Nachtzeiten durchgeführt, bei denen im Ferninfrarotbereich mit Wärmebildern das Erwärmungs- und Abkühlungsverhalten verschiedener Materialien (Steine, Gräser usw.) gemessen wurde, um den Einsatz bei archäologischen Anwendungen zu evaluieren. In einem anderen Kontext wurden andererseits Serien von Nahinfrarotaufnahmen zur Bestimmung von Vegetationsindizes (z.B. NDVI) erstellt, die direkten Nutzen in der Landwirtschaft haben. Eine andere, klassische Anwendung für eine Kamera mit zwei Kameraköpfen ist das Stereosehen und damit verbunden eine optische Distanzmessung, welche hier ebenfalls vorgestellt wird. Ziel des Gesamtvorhabens ist es, die verschiedenen Bildinformationen zusammenzufassen. Das sind zum einen Bildaufnahmen in verschiedenen Frequenzbereichen und zum anderen 3D-Informationen aus der Distanzmessung per Stereokamera.

Deskriptoren: Multikopter; Infrarottechnologie; Stereosehen; Distanzmessung.

Abstract: *Infrared technology can be profitably used in various applications such as agriculture, but also in other fields, such as archeology. The mobile systems laboratory at the Harz University of Applied Sciences has spent several years with using flying robots (multicopters) in different scenarios. As part of several research projects, among others, the capabilities of cameras that operate in different frequency ranges have been investigated. In addition to the visible light, these are near and far infrared.*

Several long-term tests were conducted at different times of day and night in which the warming and cooling behavior of different materials (stones, grass, etc.) has been

measured with far-infrared thermal images to evaluate their usability in archaeological applications. In another context, series of near-infrared images have been taken for the determination of vegetation indices (e.g. NDVI), which have direct benefits in agriculture. Another classic application for a camera with two camera heads is stereo vision and – associated with this – optical distance measurement. The aim of the overall project is to combine the different information. On the one hand there are the images in different frequency ranges and on the other hand there is 3D information from the distance measurement by the stereo camera.

Keywords: *multicopter; infrared technology; stereo vision; distance measuring*

1 Einleitung

Infrarottechnologie kann gewinnbringend in diversen Anwendungen wie der Landwirtschaft, aber auch in anderen Bereichen, wie der Archäologie, eingesetzt werden. Im Folgenden sollen daher verschiedene Einsatzmöglichkeiten der Infrarottechnologie sowie des Stereosehens vorgestellt werden. In der Regel werden von Multikoptern Luftaufnahmen gemacht mit mehreren Kameras in verschiedenen Spektralbereichen des Lichts (sichtbares Licht, Nah- und Ferninfrarot etc.). Die gleichzeitige Verwendung mehrerer Kameras ermöglicht außerdem Stereosehen und damit verbunden eine optische Distanzmessung. Letzteres kann unter anderem dazu genutzt werden, um in einem definierten Abstand an einem zu untersuchenden Objekt entlang zu fliegen (sogenanntes Visual Docking). Hierbei wird der Abstand laufend gemessen und gegebenenfalls korrigiert.

Stereosehen und eine optische Distanzmessung können parallel auf einer Smart-Kamera durchgeführt werden, so dass auf einen zusätzlichen Sensor verzichtet werden kann, was zu einer Gewichtsersparnis für das Multikopter-System führt. Durch einen an die Bildsensoren angebotenen Mikroprozessor ist die Smart-Kamera in der Lage, Bilder direkt bei der Aufnahme zu analysieren. Damit ist es zusätzlich möglich, Differenzbilder als Grundlage von Vegetationsindizes zu berechnen. Dies alles wollen wir im Folgenden nun ausführlicher darstellen.

2 Ferninfrarot

Kamera

Für Messungen im Ferninfrarotbereich kommt in verschiedenen Projekten an der Hochschule Harz eine Wärmebildkamera vom Typ FLIR TAU2 336 zum Einsatz, die mit einer Auflösung von 320 x 240 Pixeln arbeitet. Diese Kamera wurde u.a. während einer Befliegung eines Ackers in der Nähe von Oschersleben eingesetzt – einer Fläche, die vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt aufgrund von Voruntersuchungen vorgeschlagen wurde. Motivation für diese Befliegung war die Analyse des Ackerbodens in Hinblick auf eine Erkennung archäologischer Strukturen. Es wurde eine

Serie von einzelnen Wärmebildern erstellt. In **Abbildung 1** (rechts) lässt sich sehr gut die Struktur des Ackers erkennen; blaue Bereiche (kalt) liegen im Schatten, rote Bereiche (warm) werden von der Sonne angestrahlt. Leider sind diese Bilder wenig aussagekräftig in Bezug auf mögliche archäologische Anwendungen.

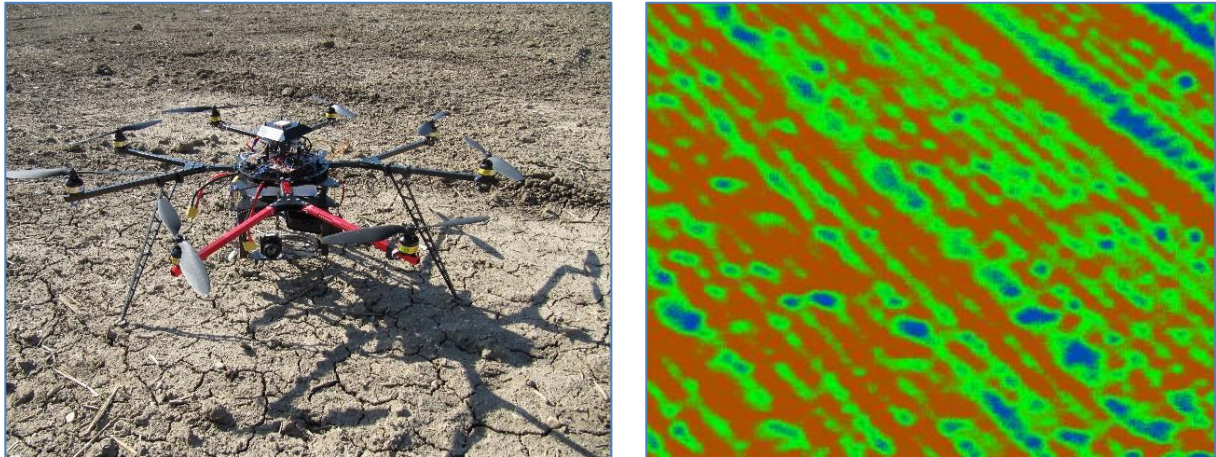


Abbildung 1: Multikopter vor Befliegung der Ackerfläche (links) und Wärmebild der Ackerfläche (rechts)

Langzeitmessungen

Es wurde daraufhin ein Langzeitversuch durchgeführt, um die unterschiedlichen Erwärmungs- und Abkühlungsverläufe von Stein und Gras zu analysieren. **Abbildung 2** zeigt das Wärmebild der untersuchten Fläche, in **Abbildung 3** werden die Temperaturverläufe gezeigt.

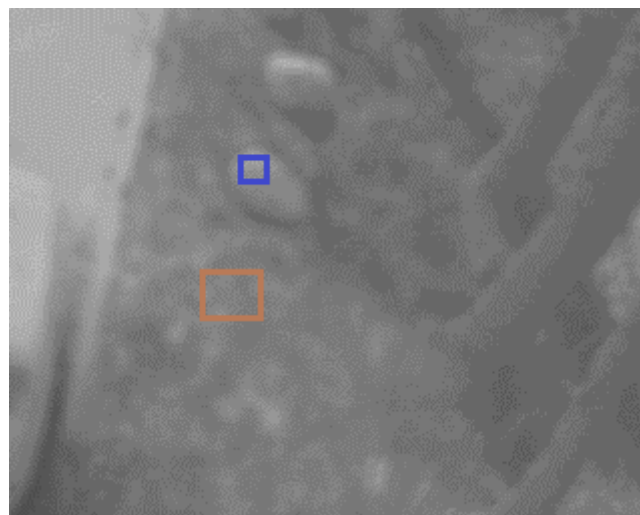


Abbildung 2: Wärmebild Parkplatz und Wiese. Die Markierungen geben die Messbereiche an (blau = Stein, braun = Wiese).

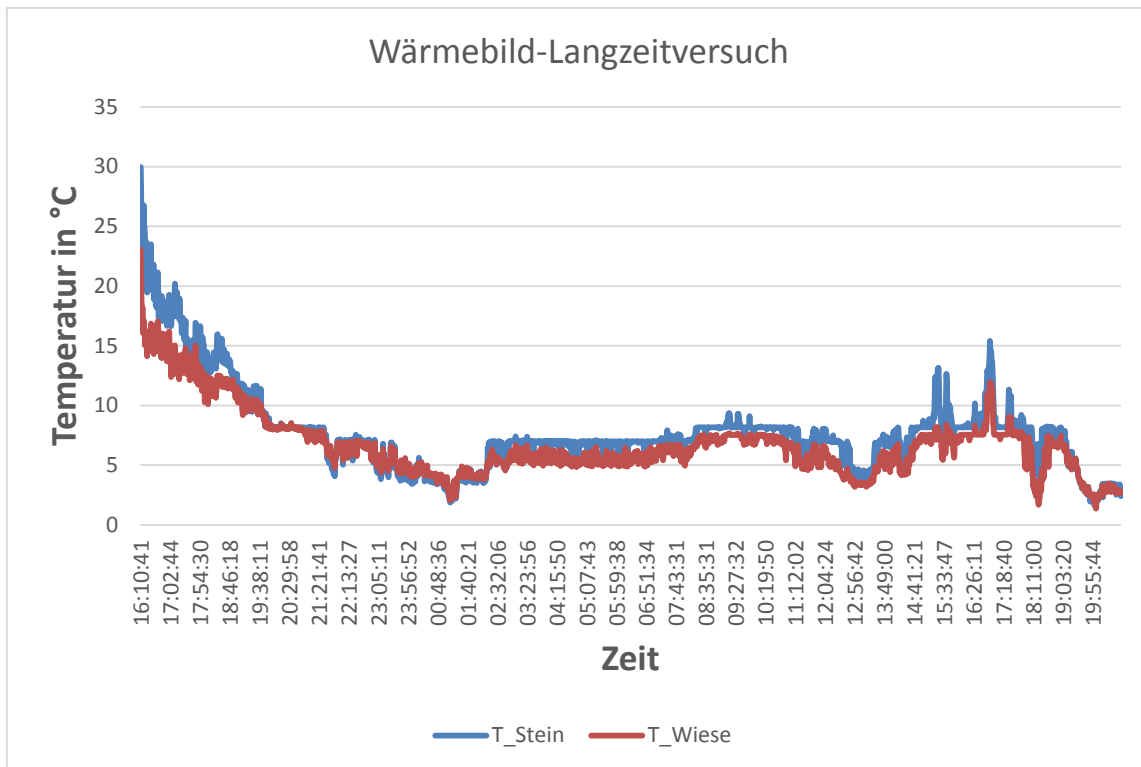


Abbildung 3: Temperaturverläufe der beiden Messbereiche aus **Abbildung 2**

Wie sich erkennen lässt, zeigen die beiden Verläufe grundsätzlich das gleiche Verhalten: Zur Nacht hin kühlen sich beide Bereiche deutlich ab. Interessant ist, dass die Differenz zwischen den Temperaturen geringer wird und die Oberfläche des Steins zeitweilig sogar geringfügig kühler ist als die der Wiese. Durch Sonneneinstrahlung während des Tages vergrößert sich die Differenz wieder zugunsten der Steintemperatur. Hier sind weitere Untersuchungen nötig, um für spezifische Anwendungen in Archäologie sowie Landwirtschaft genauere Analysen und Interpretationen von Wärmebildern zu ermöglichen.

3 Nahinfrarot

Kamera

Als weiterer optischer Sensor kommt in Projekten mit agrarwissenschaftlichem Bezug eine Smart-Kamera der Firma Vision Components (VISION COMPONENTS 2016) mit zwei Kameraköpfen (Auflösung jeweils 2048 x 1088 Pixel) zum Einsatz, die aufgrund verschiedener Filter in der Lage ist, parallel Bilder im sichtbaren und im Nahinfrarotbereich aufzunehmen. Durch einen an die Bildsensoren angebotenen Mikroprozessor ist die Smart-Kamera zudem in der Lage, Bilder direkt bei der Aufnahme zu analysieren.

Die Kamera muss nach einem Objektiv- bzw. Filterwechsel kalibriert werden, damit die Bilder verzerrungsfrei aufgenommen werden und die Bildausschnitte beider Sensoren möglichst identisch sind. Für die Kalibrierung werden bis zu 40 Stereobilder aufge-

zeichnet, in denen auf den jeweiligen Einzelbildern ein Referenzschachbrettmuster mit bekannter Anzahl und Größe an Quadraten abgebildet ist (siehe **Abbildung 4**). Daraus wird ein Stereokameramodell berechnet, mit dem die Bilder für die spätere Analyse entzerrt und rektifiziert werden (OELZE *et al.* 2015).

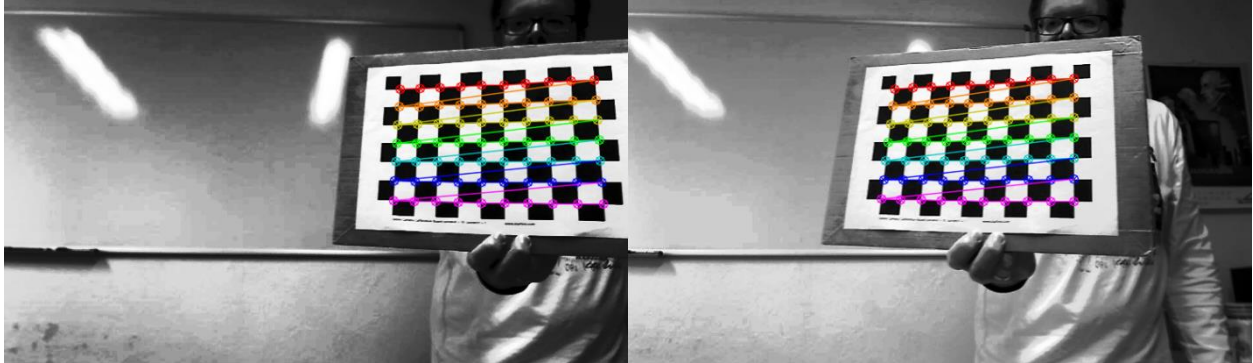


Abbildung 4: Kamerakalibrierung mit Schachbrettmuster

Stereokamera und NDVI

Durch ihre zwei getrennten Bildsensoren, die synchronisiert Bilder aufnehmen, eignet sich diese Kamera sehr gut für stereoskopische Einsatzzwecke wie z.B. die Distanzmessung oder das Erstellen von Indizes auf Basis von Aufnahmen in verschiedenen Frequenzbereichen.



Abbildung 5: Aufnahme mit IR-Durchlassfilter (NIR, links) und mit IR-Sperrfilter (Rot, rechts)

Eine häufig genutzte Anwendung in den Agrarwissenschaften ist die Berechnung des sog. Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) (WEIER & HERRING 2000). Mit diesem Index lassen sich Wachstumsaktivitäten von Pflanzen beurteilen. Für die Berechnung dieses Indexes benötigt man Bilddaten sowohl im sichtbaren als auch im Nahinfrarotbereich (siehe **Abbildung 5**). Die Formel für die Berechnung des NDVI vergleicht die Intensität des Rot- mit dem Nahinfrarotbereich. Es gilt: $NDVI = \frac{NIR-Rot}{NIR+Rot}$ (NIR = Nahinfrarot 720-900 nm, Rot = sichtbarer/roter Bereich 620-700 nm).

Entfernungsmessung mit der Stereokamera

Trotz der Unterschiede in den Bildern der beiden Frequenzbereiche ist es möglich, gemeinsame Punkte für die Entfernungsberechnung zu bestimmen. Diese Art der Dualanalyse mit einem Nahinfrarotdurchlassfilter eignet sich grundsätzlich nur für den Außeneinsatz, da hier genug Licht im Nahinfrarotbereich vorhanden ist. Da beide Verfahren gleichzeitig auf der Kamera durchgeführt werden, kann auf einen zusätzlichen Sensor verzichtet werden und es ergibt sich eine Gewichtsersparnis.



Abbildung 6: Stereobild mit Objektversatz im linken und rechten Einzelbild

Über den horizontalen Versatz einzelner Objekte in den Stereobildern (siehe **Abbildung 6**) können gleichzeitig zur Anwendung im Nahinfrarotbereich die Entfernungen der Objekte zur Kamera bestimmt werden (HARTLEY & ZISSERMAN 2003). Diese Entfernungen werden mit Hilfe des Stereokameramodells berechnet. Durch die manuelle Kalibrierung der Stereokamera und der dabei auftretenden kleinen Abweichungen ist es notwendig, die berechnete Entfernung noch einmal zu korrigieren. Die dafür erforderlichen Parameter werden in unseren Projekten durch zwei Methoden ermittelt:

Für eine hohe Genauigkeit in einem bestimmten Messbereich werden nach der Stereokalibrierung zum einen *manuell* die tatsächlichen Entfernungen von verschiedenen Messpunkten zusammen mit den berechneten Entfernungen erfasst. Die Korrekturfaktoren werden anschließend mit Hilfe der linearen Regression bestimmt (siehe **Abbildung 7**).

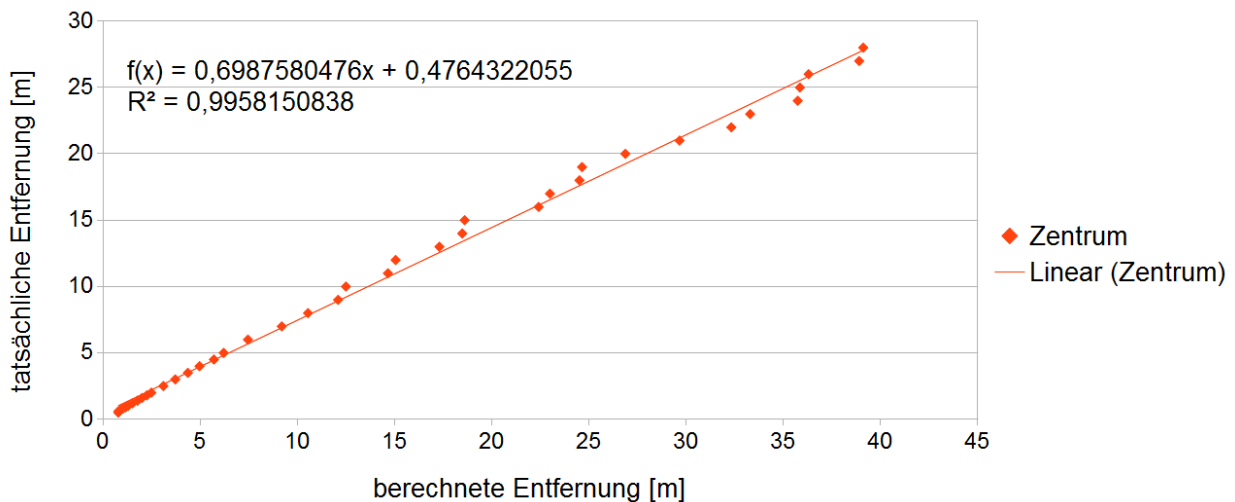


Abbildung 7: Lineare Regression zur Bestimmung der Korrekturfaktoren der Entfernungsberechnung

Für eine höhere Genauigkeit über den gesamten Messbereich der Stereokamera wird zum anderen eine *automatische* Distanzkalibrierung durchgeführt. Hierbei werden nach der Stereokalibrierung nochmals bis zu 50 weitere Bilder des Referenzschachbrettmusters aufgenommen und analysiert. Aus allen in jeweils einem Stereobild detektierten Ecken des Schachbretts, für die eine 3D-Koordinate bestimmt werden kann (in **Abbildung 8** grün markiert), wird eine 3D-Punktewolke berechnet, die mit dem 3D-Referenzmodell des Schachbrettes zu einem mittleren Korrekturfaktor verrechnet wird. Eine manuelle Entfernungsmessung ist bei diesem Verfahren nicht notwendig.

Die Algorithmen zur Kalibrierung der Kamera, zur Bildanalyse und zur Entfernungsbestimmung wurden mit Hilfe der C++-Bibliothek OpenCV implementiert (BRADSKI & KAEHLER 2013). Die Abweichungen der berechneten Distanzen betragen verfahrens- und kamerabedingt 1,5% bis 10% der tatsächlichen Entfernung in einem Bereich von 0,5 m bis 70,0 m. Diese Genauigkeit reicht aus, um Multikopter in einer bestimmten Entfernung über dem Boden fliegen zu lassen, um Hindernisse zu erkennen oder zu befliegende Objekte autonom anzusteuern. In **Abbildung 9** sind für das linke Teilbild aus **Abbildung 6** die Entfernungen farblich markiert, vom Nahbereich rot (unter 1,5 m), über grün (3,5 m), blau (6,0 m) bis weiß (35,0 m). Distanzen über 35,0 m und Pixel, für die keine Entfernung bestimmt werden konnte, sind nicht markiert.

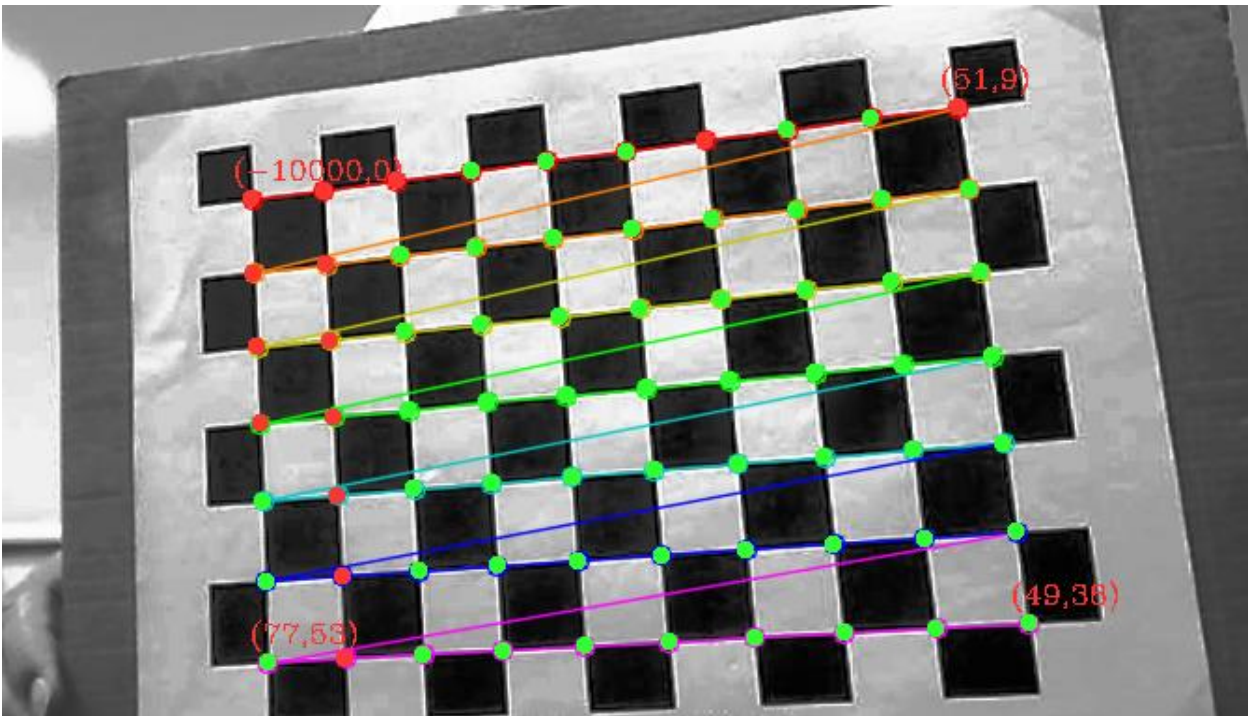


Abbildung 8: Referenzschachbrettmuster zur automatischen Distanzkalibrierung

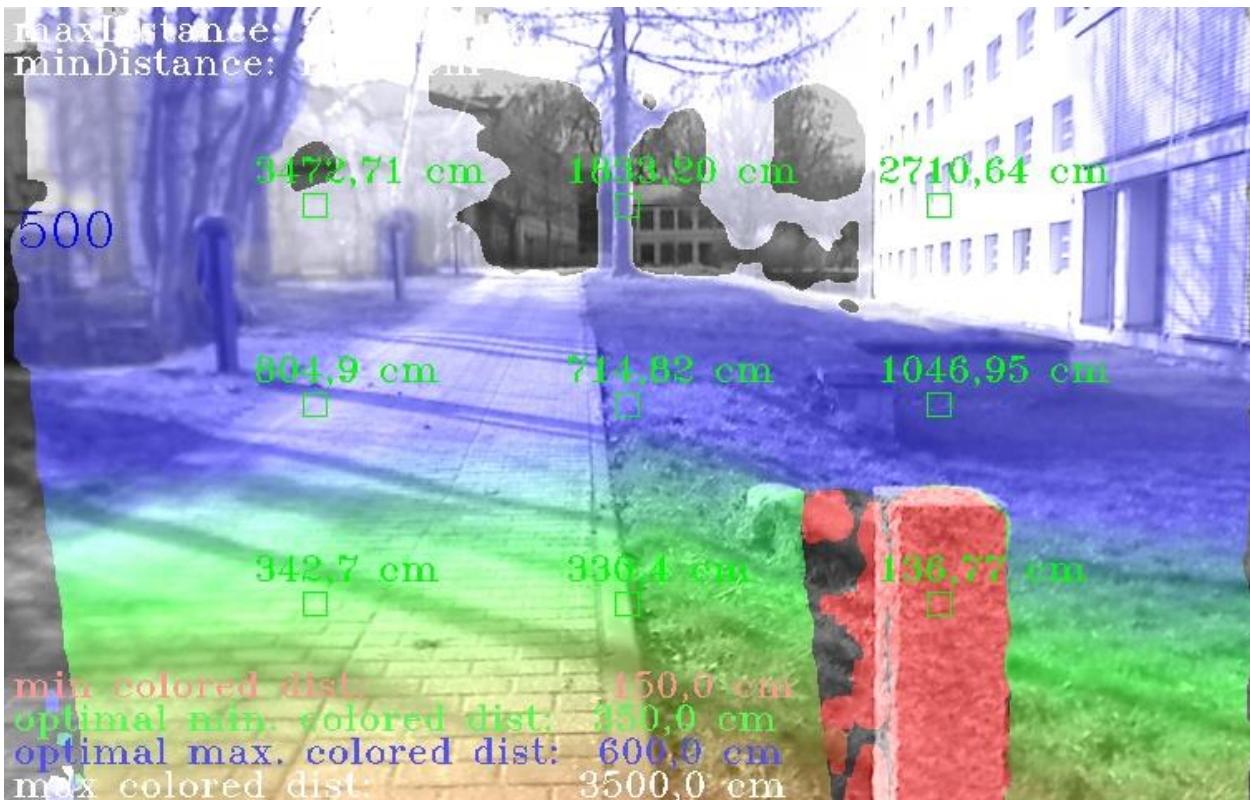


Abbildung 9: Distanzmessungen im Stereobild

4 Flugassistenzsystem

Für den Einsatz von Multikoptern in den Agrarwissenschaften ist eine (teil-)autonome, koordinierte Befliegung größerer Flächen aber auch spezieller Objekte erforderlich. Im Projekt InspektoKopter wurde ein Flugassistenzsystem entwickelt, das den Piloten am Boden in diesen Bereichen unterstützt und mit einem Computer (Embedded-System) auf dem Multikopter kommuniziert. Das Embedded-System wertet die aktuellen Sensor- und Positionsdaten des Multikopters aus und kann selbst neue Zielpunkte und Wegpunktlisten berechnen bzw. vom Flugassistenzsystem empfangen und an den Multikopter übermitteln. An das Embedded-System können externe Sensoren, z.B. die Stereokamera zur Entfernungsmessung, angeschlossen werden. In **Abbildung 10** ist das Hauptfenster des Flugassistenzsystems dargestellt. Hier werden u.a. verschiedene Sensorwerte wie Position, Multikopterausrichtung, Flugrichtung, Lage, Geschwindigkeit, Flughöhe und Steigrate visualisiert, zusammen mit dem Live-Bild einer Kamera am Multikopter.

Da im Drittmittelprojekt InspektoKopter die Inspektion von Windenergieanlagen (teil-) automatisiert werden soll, wurde im Embedded-System das Modul Visual Docking zur autonomen Befliegung von Rotorblättern integriert, dessen Zustände im Flugassistenzsystem dargestellt und gesteuert werden können. Dieses Modul berechnet anhand von Entfernungsmessungen mit der Stereokamera und den aktuellen Positionsdaten des Multikopters während der Befliegung neue Wegpunkte, um in einem optimalen Abstand am Rotorblatt entlang zu fliegen.

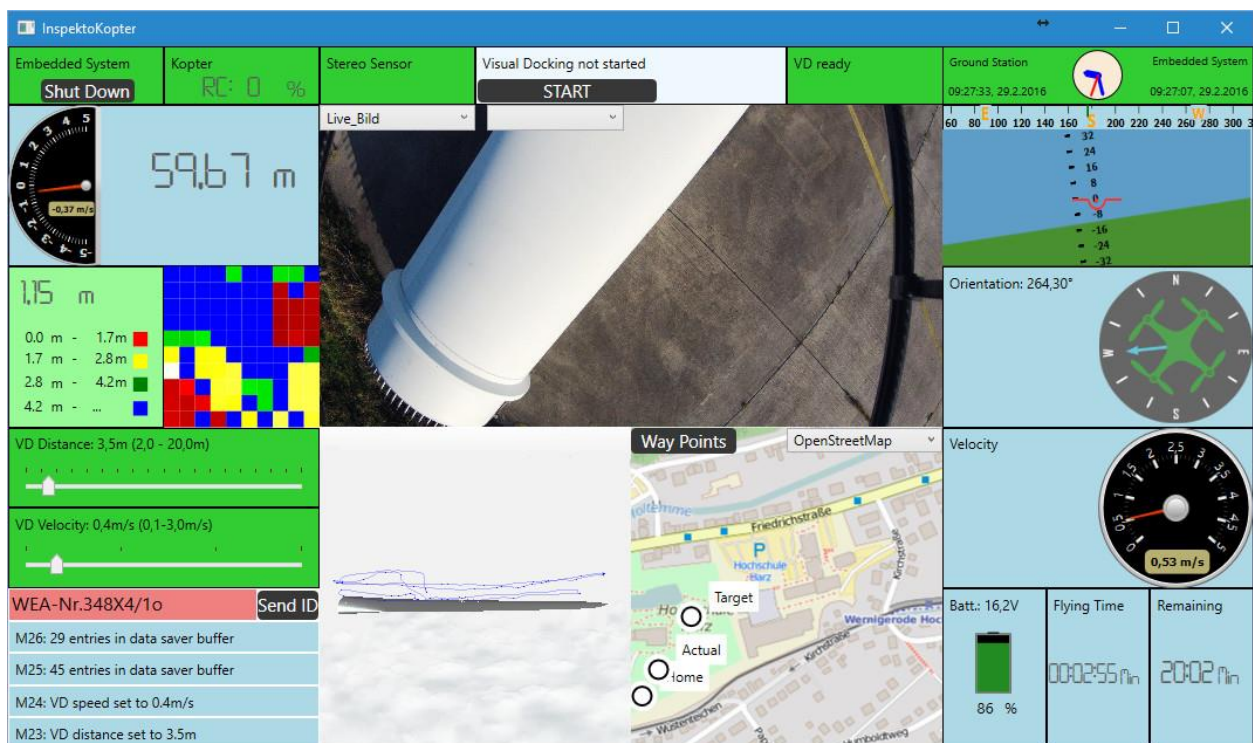


Abbildung 10: Flugassistenzsystem

Im Fenster zur allgemeinen Befliegungsplanung (Schaltfläche Way Points, unten in **Abbildung 10**) können Wegpunkte frei positioniert werden. Aus diesen wird dann eine Flugroute berechnet (siehe **Abbildung 11**). Eine weitere Möglichkeit ist die Angabe einer zu befliegenden Fläche, die auch auf *mehrere* Multikopter aufgeteilt werden kann (siehe **Abbildung 12**). Auch hier werden optimierte Flugrouten berechnet (MARKS *et al.* 2014), die an das Embedded-System weitergeleitet werden.

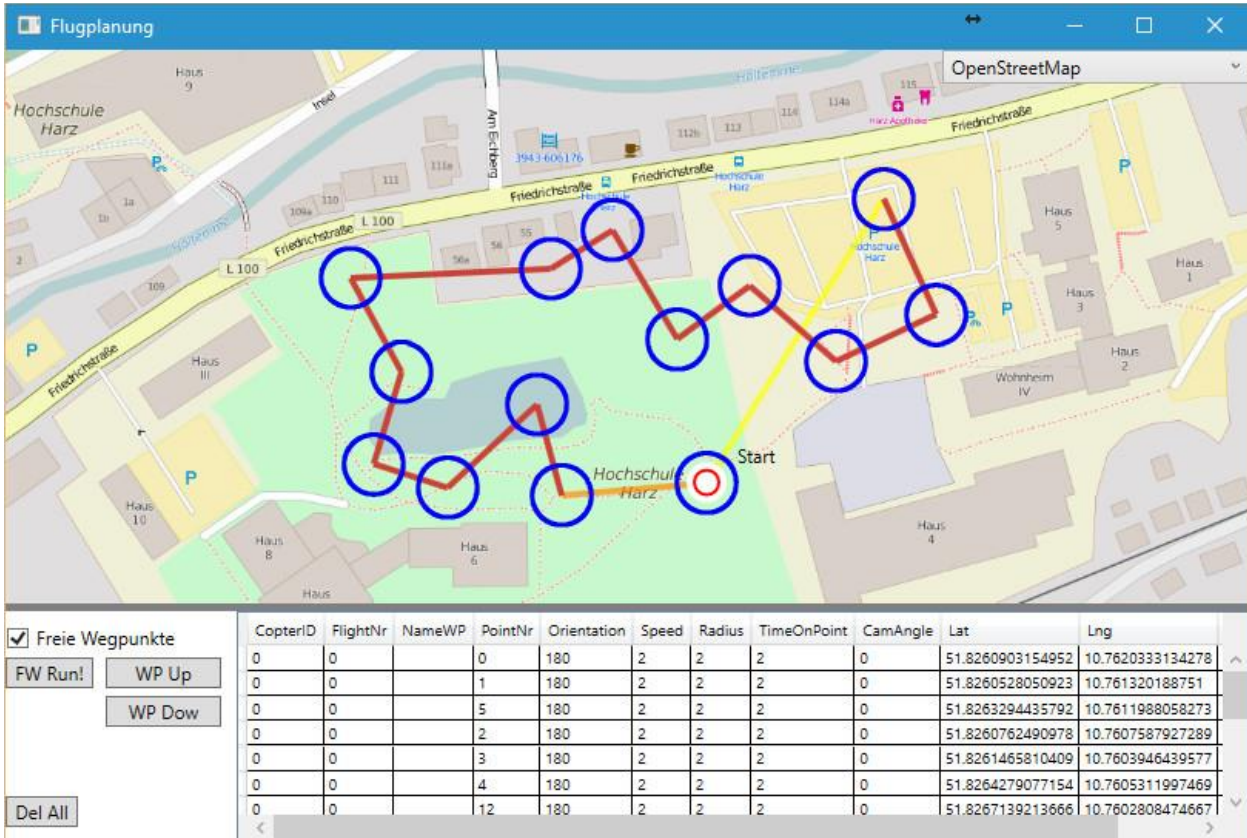


Abbildung 11: Freie Wegpunktplanung im Flugassistenzsystem



Abbildung 12: Flächenbeflegungsplanung im Flugassistenzsystem für mehrere Multikopter

5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurden einige der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Multikoptern zusammen mit Infrarottechnologie gezeigt. Diese umfassen die Landwirtschaft, die Archäologie (LIEBERWIRTH *et al.* 2014) und zahllose weitere Anwendungen. Der technologische Fortschritt auf diesen Gebieten ist enorm. Die Entwicklung eines Flugassistenzsystems erleichtert hierbei jedoch die Integration und erfolgreiche Anwendung der verschiedenen Komponenten.

Danksagung

Die Arbeiten wurden teilweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 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 Matthias Körschens, Pouya Payrow, Janet Richter und Wolfgang Werner.

Literaturverzeichnis

- BRADSKI G.R., KAEHLER A. (2013):** Learning OpenCV – Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. O’Reilly, 2nd edition, Early Release Ebook
- FLIR (2016):** FLIR TAU 2, URL: <http://www.flir.com/cores/display/?id=54717>
- HARTLEY R., ZISSERMAN A. (2003):** Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2nd edition
- LIEBERWIRTH U., FRITSCH B., METZ M., NETELER M., KÜHNLE K. (2014):** Applying Low Budget Equipment and Open Source Software for High Resolution Documentation of Archaeological Stratigraphy and Features. In: CAA 2013 Proceedings of the 41st Conference in Computer Application and Quantitative Methods in Archaeology, Perth, Australia, 25-28 March 2013, p. 390-405
- MARKS M., SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG F. (2014):** Optische Sensorik an Multikoptern. In MANUELA ZUDE-SASSE and MARTIN KRAFT, editors, Proceedings 20. und 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 88, pages 151-158, Hochschule Osnabrück
- OELZE M., SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG F. (2015):** Smart-Kamera-basierte Online-Bildanalyse von Infrarot- und Stereobildern an Multikoptern. In MANUELA ZUDE-SASSE and MARTIN KRAFT, editors, Proceedings 20. und 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 88, pages 124-128, Thünen-Institut, Braunschweig
- VISION COMPONENTS (2016):** VCSBC quadro Smart-Kamera,
URL: <http://www.vision-components.com/produkte/oem-smart-kameras-dspvcrt/oem-boardcams/vcsbc-multi-sensor/>
- WEIER J., HERRING D. (2000):** Measuring Vegetation (NDVI & EVI),
URL: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

Flourish – A robotic approach for automation in crop management

Ein Robotikansatz zur Automation im Kulturpflanzenmanagement

Frank Liebisch¹, Johannes Pfeifer¹, Raghav Khanna², Philipp Lottes³, Cyrill Stachniss³, Tillmann Falck⁴, Slawomir Sander⁵, Roland Siegwart², Achim Walter¹, Enric Galceran²

¹ *Crop Science Lab, Institute of Agricultural Sciences, Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland*

² *Autonomous Systems Lab, Department of Mechanical and Process Engineering, Federal Institute of Technology Zürich (ETHZ), Switzerland*

³ *Department of Photogrammetry, University of Bonn, Germany*

⁴ *Future Systems Industrial Technology (CR/AEI), Robert Bosch GmbH, Renningen, Germany*

⁵ *Deepfield Robotics, Product Area Agriculture (BOSP/PAA), Robert Bosch Start-up GmbH, Renningen, Germany*

E-Mail: frank.liebisch@usys.ethz.ch

Abstract: The goal of the Flourish project is to bridge the gap between the current and desired capabilities of agricultural robots by developing an adaptable robotic solution for precision farming. Thereby, combining the aerial survey capabilities of a small autonomous multi-copter Unmanned Aerial Vehicle (UAV) with a multi-purpose agricultural Unmanned Ground Vehicle (UGV), the system will be able to survey a field from the air, perform targeted intervention on the ground, and provide detailed information for decision support, all with minimal user intervention. The system can be adapted to a wide range of farm management activities and different crops by choosing different sensors, status indicators and ground treatment packages. The gathered information can be used alongside existing precision agriculture machinery, for example, by providing position maps for variable rate fertilizer application.

The presentation will introduce the Flourish consortium and the concept of this project using the results of the first year field campaign. Two key parts of the project will be shown in more detail: first, the field mapping by means of an UAV. Particularly, the field 3D reconstruction approach (KHANNA *et al.* 2015) and the use of multi-spectral camera data to derive weed pressure or crop property maps (LIEBISCH *et al.* 2014) with examples for subsequent crop management decision support. The second part will show the automated image acquisition by the UGV and a subsequent plant classification with a four step pipeline differentiating crop from weed in real time (LOTES *et al.* 2016). The presentation will close with a short outlook on not shown project packages like automated orientation and movement of the UAV and UGV and the project's time line.

Keywords: precision farming, agriculture, multispectral camera, UAV, UGV, 3D reconstruction, trait detection

Zusammenfassung: Das Projekt Flourish zielt darauf ab die Lücke zwischen den derzeit vorhandenen und den gewünschten Möglichkeiten landwirtschaftlicher Roboter zu schließen. Dafür werden die luftgestützten Erkundungsfähigkeiten von kleinen autonomen Multikopter-Drohnen (UAV) mit unbemannten landwirtschaftlichen Mehrzweck-Fahrzeugen (UGV) kombiniert. Das System soll fähig sein ein Feld aus der Luft zu erkunden, zielgerichtete Kultivierungsmaßnahmen im Feld durchzuführen und detaillierte Informationen zur Entscheidungsunterstützung zur Verfügung stellen, alles mit minimalem Benutzer-Input. Das System kann durch geeignete Wahl der Sensoren, Statusindikatoren und Feldbehandlungs-module der UGV an viele Kultivierungsmaßnahmen und verschiedene Nutzpflanzen angepasst werden. Die gesammelten Informationen können auch mit gängigen landwirtschaftlichen Maschinen genutzt werden, zum Beispiel für das bedarfsgerechte Ausbringen von Dünger.

Die Präsentation stellt das Flourish-Konsortium und dessen Konzept anhand von Versuchsergebnissen aus der ersten Feldmesskampagne vor. Zwei wichtige Unterprojekte werden genauer betrachtet. Gezeigt wird zuerst die Feldkartierung mittels UAV, insbesondere die 3D-Rekonstruktion (KHANNA et al. 2015) und Multispektralmessung der räumlichen Verteilung von Unkraut-Druck oder Nutzpflanzeigenschaften (LIEBISCH et al. 2014) mit einer anschließenden Entscheidungshilfe für Feldinterventionen. Der zweite Teil befasst sich mit der automatischen Bilderfassung am UGV und der daraus resultierenden Pflanzenklassifizierung zur Unterscheidung von Kulturpflanze und Unkraut mittels eines Vierschrittverfahrens in Echtzeit (LOTTEs et al. 2016). Die Präsentation schließt mit einem kurzen Ausblick auf nicht gezeigte Teilprojekte wie die automatische Orientierung und Bewegung der UAV und UGV und der geplanten Projekt-Zeitlinie.

Deskriptoren: Präzisionslandwirtschaft, Multispektralkamera, UAV, UGV, 3D-Rekonstruktion, Eigenschaftserkennung

1 Introduction

Today's agriculture needs to improve its resource use efficiency for farm inputs like fertilizers and pesticides, and thereby reducing costs and detrimental effects on the environment. Precision farming is a technical approach to facilitate such needs. Many applications today improve single field management tasks such as precision fertilizer application in form of variable rate application according to tractor based sensor information or for large field areas based on satellite information. However, there is a gap between close to the crop and far away sensing level and in flexibility and applicability of systems. Unmanned aerial vehicles (UAV) might help to bridge the remote sensing gap,

because they allow monitoring the fields with relatively high detail without relying on a machine driving in the field and thereby collecting data before the actual intervention in the field starts. Their relatively high flexibility should also allow frequent monitoring necessary for short-term reactions for field management and intervention.

To build autonomous robots for farming applications, several challenges need to be addressed, among them robust perception for on-field operation. This paper will focus on information derived from sensors within an exemplary robotic crop management chain on the example of sugar beet. Early weed detection and control is a very important step during the cultivation of this cash crop because of its low competition potential against weeds during early growth.

2 Flourish project

The goal of the Flourish project is to bridge the gap between the current and desired capabilities of agricultural robots by developing a flexible and adaptable robotic solution for precision farming. Thereby, combining aerial survey capabilities of small autonomous multi-copter UAV with a multi-purpose agricultural UGV, such a system should be able to survey a field from the air, perform targeted intervention on the ground, and provide detailed information for decision support to the farmer, all with minimal user intervention (**Figure 1**).

2.1 The flourish concept

To build autonomous robots for farming applications, several challenges need to be addressed, among them robust perception for on-field operation and information retrieval for agronomic tasks or decision support. The flourish projects aims to investigate two main scenarios: 1) weed detection and subsequent control measures in the field and 2) detection of crop nitrogen status from UAV. Additional scenarios such as crop disease infestation or water status are being investigated as they occur.

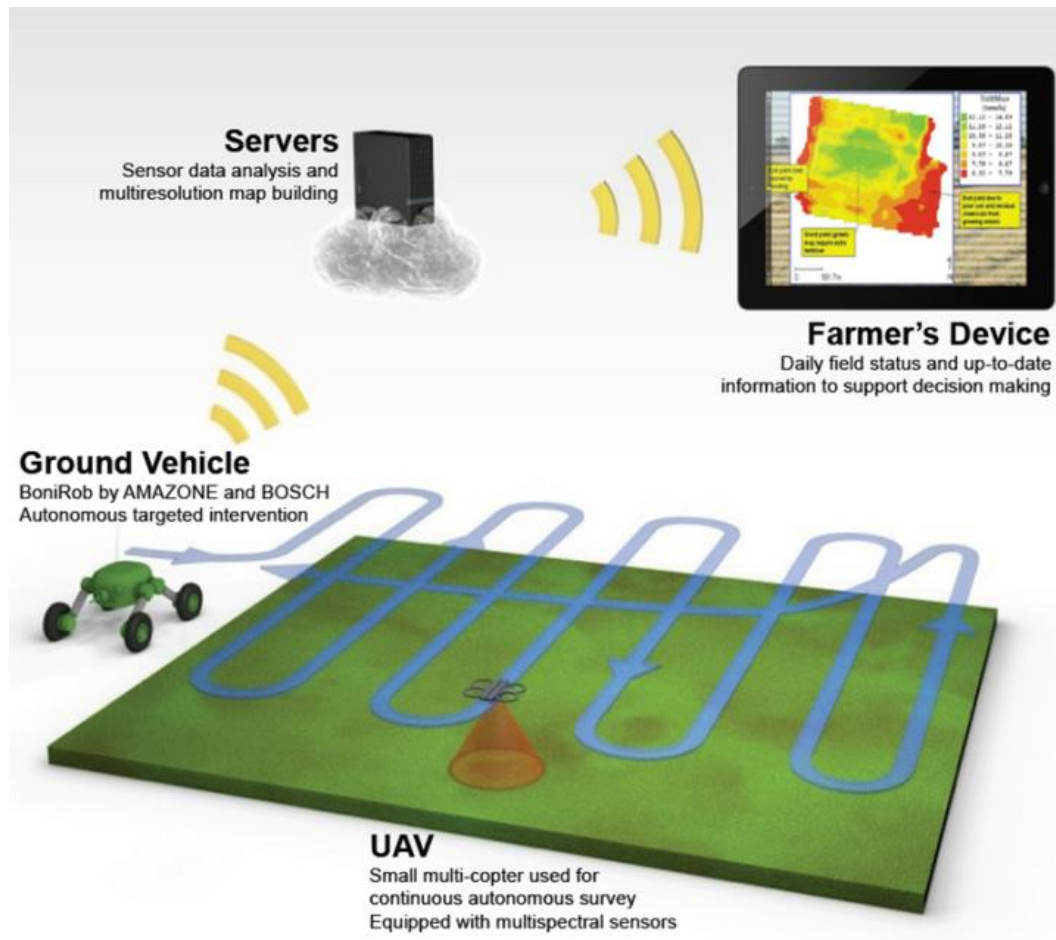


Figure 1: Visualization of the Flourish concept

2.2 The consortium

The Flourish consortium consists of seven highly qualified partners with know-how from robot design to crop management. The involved partners are the Autonomous Systems Lab and the Crop Science Lab of ETH Zurich, the department for Photogrammetry and Remote Sensing at University of Bonn as part of the Faculty for Agriculture and the Institute for Geodesy and Geoinformation, The Bosch Group and their subsidiary Deep-field robotics, the French Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Sapienza Università di Roma, Department of Computer and System Sciences and the AS-SAM - Agency for Agro-food Sector Services of Marche region (Italy). More information can be found under <http://flourish-project.eu/>.

3 Used sensors and robots

In this study two low cost unmanned aerial vehicles (UAV) were used with two different sensor setups. UAV one used for the 3D reconstruction tests was a DJI Phantom equipped with an 11 megapixel GoPro Hero R 2 camera (GoPro, Inc., USA) with a fisheye lens mounted. The second UAV used for the multispectral mapping was an

IRIS+ (3DR, Inc., USA) equipped with a Gamaya OXI VIS NIR multispectral camera set consisting of two 2 megapixel snapshot multispectral imagers 16 band VIS (450 - 670 nm), 25 band NIR (600 - 900 nm), and an integrated x 86 computer. This imaging system has a weight of 250 g, and the dimensions are 9 x 6 x 4 cm.

The UGV was a Deepfield Robotics Bonirob V3 equipped with a JAI AD 130 camera for weed detection. This camera is a two CCD 1/3" -multi-spectral-camera, with the first being a color interline transfer CCD sensor with a Bayer filter and the second a monochrome interline transfer CCD sensor with a narrow band-pass NIR filter. The resolution is 1296 (H) x 966 (V) pixels. The pixel size is 3,75 µm and the active sensor area 5.05 mm x 3.66 mm. It was used at a frame rate of 30 full images/s.

4 First results

4.1 Field information derived from multi-spectral images

The aim of this project part is to derive information about field and crop status such as weed pressure or leaf greenness maps (LIEBISCH *et al.* 2014) by using multispectral sensors adding more channels to the above mentioned measurement capability. By combining indicators we aim to facilitate and improve crop management decision support. This can be by delivering weed pressure maps, variable rate application maps for fertilizers and pesticides (fungicides and herbicides) but also by improved path planning for information retrieval and intervening machinery in the field.

Canopy cover is a well-established crop growth indicator, which can be measured with several sensors from several remote sensing levels (LIEBISCH *et al.* 2014, 2015 and Constantin *et al.* 2015, GRIEDER *et al.* 2015). Thus it may serve as a standard indicator linking *in situ* data to growth potential by using simple or complex growth models (**Figure 2**). In this way it can be used to classify values into three classes: 1.) optimal coverage reflecting a healthy crop, 2.) sub-optimal values indicating growth reduction caused by biotic or abiotic stresses or 3.) superior to the growth curve coverage indicating a high risk of weed to be present.

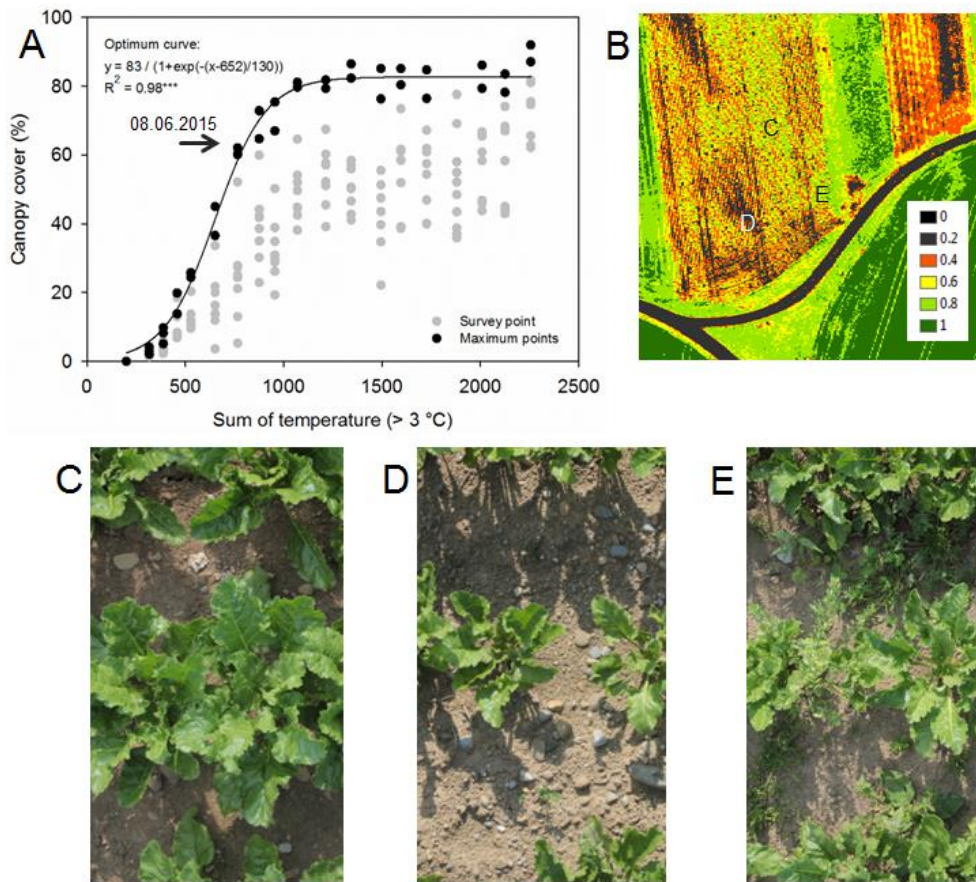


Figure 2: A) Field derived canopy cover development, B) NDVI map of the sugar beet field, C) optimal grown field plot, D) suboptimal grown field plot and E) weed infested field plot.

Once this classification is done additional information can be retrieved by involving other analysis or data acquisition steps. Other spectral indicators may involve leaf greenness as indicated by the triangular vegetation index (TGI) or nitrogen nutrition status as indicated by the photochemical reflectance index as shown by CONSTANTIN *et al.* (2015). Crop architectural information can be derived by 3D reconstruction (see details in section 4.2). Follow up flight planning might be necessary when the obtained data is not sufficient for deriving a specific management decision. In such cases the information retrieval path for the UAV might be re-planned (in real time) to follow uncertain information points getting information with higher ground resolution or even close up images of regions with high weed pressure to achieve information about weed species and leaf symptoms.

4.2 Field 3D reconstruction from UAV images: height estimation pipeline

The data was collected with a GoPro Hero R 2 with a fisheye lens mounted. The combination of a wide angle lens with a high resolution sensor gives a small ground sampling distance (1~5 cm) while maintaining a high overlap (about 80%) between consecutive

images which are essential in order to obtain satisfactory 3D reconstructions. The images were post processed using the software Pix4D (<http://www.pix4d.com/>) to obtain 3D point clouds such as the one shown in **Figure 3**. For this purpose, the software searches for points or features that are recognized in several images in order to estimate their 3D coordinate. It further takes into account the positions of these points in the single images in order to estimate the calibration of the camera. The camera model in turn is then used to optimize the 3D map. In particular it corrects for the radial distortion introduced by the wide angle lens.



Figure 3: Left: Dense point cloud of a winter wheat genotype trial generated from aerial images using Pix4Dmapper by Pix4D. The numbers indicate the plot indices used for referencing. Right: Segmented point cloud generated using automated thresholding based on the excess green index and Otsu's method. Green points represent winter wheat and pale brown represents background.

In order to extract the plant height, soil points must be distinguished from plant points. The segmentation was based on RGB data using the excess green index introduced in GITELSON (2004) to determine an green intensity value (I) for each point i in the point cloud: $I(i) = 2G(i) - R(i) - B(i)$. In the resulting intensity point cloud, green plants have a high intensity value in contrast to a low value for the background including soil surface, shadows, stones and plant debris. Once this intensity value is determined, we use OTSU's method (1975) to determine a global threshold and extract a binary point cloud from the colored one. This method has the advantage of being fully automated while giving accurate segmentation for images and point clouds collected under varying illumination conditions or with different cameras. An example of such segmentation is shown in **Figure 4**.



Figure 4: Image overlaying the automatically segmented vegetation (bright green) onto the original image.

For approximation of the ground level a linear regression surface is fitted through all vertices corresponding to the ground points A as determined by segmentation. The resulting approximation is shown in **Figure 5** left. All vertices of the point cloud are expressed in a new frame of coordinates B via a vector transformation using a rotation matrix (KHANNA *et al.* 2015). The new frame of coordinates is chosen such that the x_B - y_B -plane corresponds to the mean ground level. In order to analyze the plots, a tessellation was performed to subdivide each plot into smaller rectangles of size 0.1 m * 0.1 m containing enough green points to be representative of the geometry. The plant height can then be calculated as the distance between the upper vertices within a small tile and the ground. Additionally, a more detailed representation of the soil geometry, based on the soil vertices directly below the plants, is needed. To model the ground surface based on the vertices within a plant's neighborhood, a multinomial regression for the points within each plot is carried out. Here, a second order two-dimensional polynomial function is fitted to the vertices **Figure 5** right. The method can be adjusted to other functions. The plant height is finally calculated as the 99th percentile to exclude potential outliers as used for height extraction from terrestrial laser scan (FRIEDLI *et al.* 2016) and UAV derived point clouds (KHANNA *et al.* 2015).

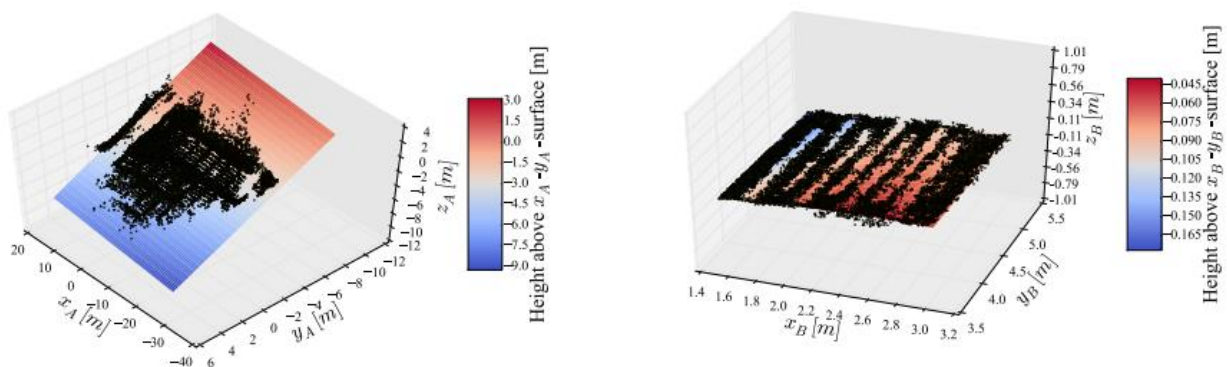


Figure 5: Left: Linear approximation of the ground surface to determine a scene's global orientation. One can observe the large variation in z coordinates creating the need for local regression surfaces for accurate height estimation. Right: Local regression surface along with the corresponding ground points from the point cloud for one plot. From KHANNA *et al.* 2015.

4.3 Automated crop-weed classification by the ground unit

The here shown vision-based classification system for mobile robots is targeted to separate sugar beets from weeds and therefore executes four principal steps. The method is described in detail by LOTTES *et al.* (2016). It first separates the vegetation from the remaining parts of the image, i.e., mostly soil by making use of a NDVI threshold (**Figure 6**). Then, a series of spectral and object based features are computed in the image regions corresponding to vegetation. A random forest decision tree approach is used for performing the classification based on the computed features. In a last step, the neighborhood information between classified regions is taken into account through Markov random fields to improve the individually computed classifications of the random forest.

The approach can also exploit spatial priors, for example, if value crops were roughly planted at a known distance.

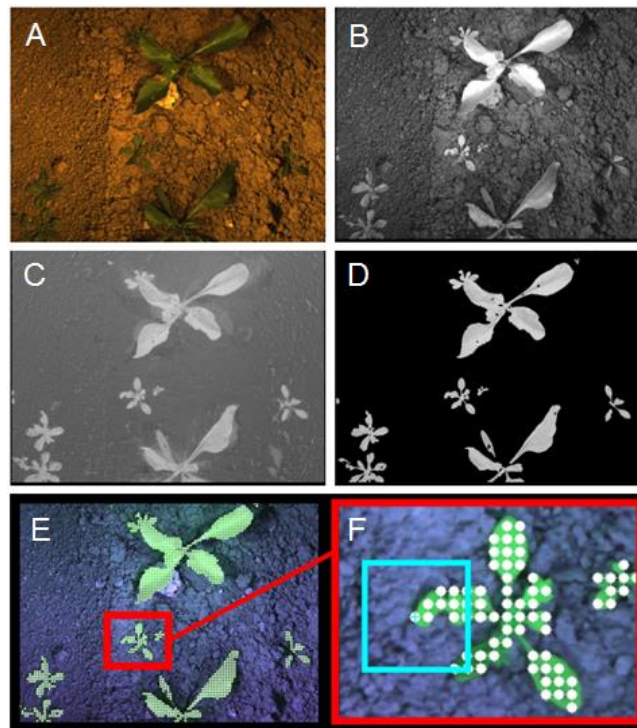


Figure 6: RGB (A) and NIR image (B), NDVI (C) and masked NDVI image according to the vegetation detection (D). Key points (white) for classification at a 3 mm distance on the object and an example neighborhood (E+F). Blue represents the region that is considered for the feature computation.

The approach was evaluated on sugar beet plants at two to four leaf growth stage and weed plants that grew on test fields near Stuttgart, Germany. The system provides accurate classification results (**Figure 7**). In this precision farming scenario, it is important to keep the number of false negatives, i.e., the number of sugar beet plants that are classified as weeds, small. This type of misclassification should be avoided as this would lead to the elimination of the value crop by the robot. In contrast, not detecting a weed is less critical than destroying the crop. The evaluation of this approach suggests that the majority of weed plants get correctly classified while the number of false positives remains small.

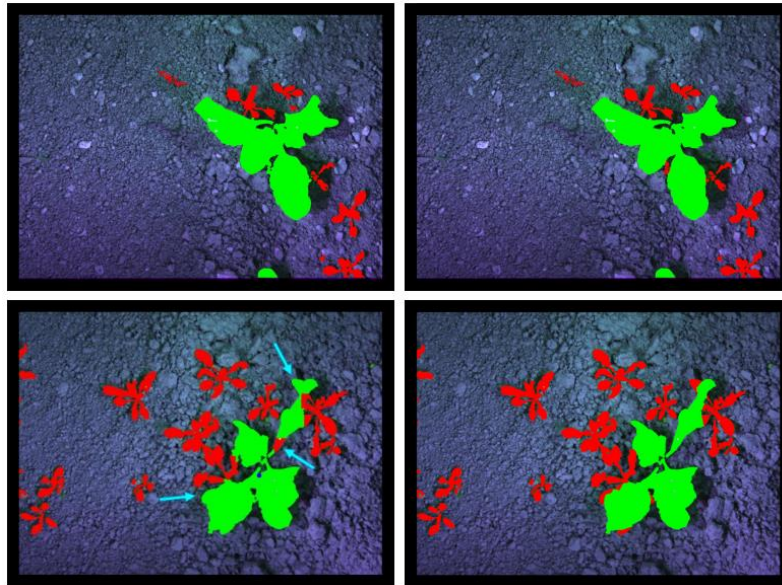


Figure 7: Example results of value crop/weed classification system based on UGV data. In green value crop (sugar beet) and weeds in red. From LOTTES *et al.* (2016)

5 Conclusion and outlook

An aerial information retrieval pipeline has been developed including spatial information and crop height estimation. The maps of crop coverage or pigment information can be used for variable rate application of fertilizers. Crop height information may be interpreted independently and may deliver information about crop vitality. The developed weed perception system includes vegetation detection and feature extraction; the classification performance obtained so far is good. All systems have to be tested and adjusted to different, likely more complicated, field situations, containing different weed species and earlier and later growth stages of sugar beet.

Acknowledgment:

We thank the other project partners for their helpful comments and related work and the field crews and team members making this work possible. In particular we thank Martin Bertschi and Ronald Vögeli from the agricultural school Strickhof Eschikon, Zürich who organised and managed the sugar beet field site used for the aerial multispectral surveys and Gamaya in particular Dragos Constantin for the multispectral measurement flight. This research was sponsored by the European Community's framework programme Horizon 2020 under grant agreement no. 644227-Flourish.

References

- CONSTANTIN D., REHAK M., AKHTMAN Y., LIEBISCH F. (2015):** Detection of crop properties by means of hyperspectral remote sensing from a micro UAV. 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft and 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft. 6. und 7. Mai 2015, Braunschweig, Germany. <https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/frontdoor/index/index/docId/7595>
- Friedli M., Kirchgessner N., Grieder C., Liebisch F., Mannale M., Walter A. (2016):** Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions. *Plant Methods* 12(1): 1-15
- GITELSON A.A. (2004):** Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation, *Journal of plant physiology*, vol. 161, no. 2, pp. 165–173
- GRIEDER C., HUND A., WALTER A. (2015):** Image based phenotyping during winter: a powerful tool to assess wheat genetic variation in growth response to temperature. *Functional Plant Biology* published online, <http://dx.doi.org/10.1071/FP14226>
- KHANNA R., MÖLLER M., PFEIFER J., LIEBISCH F., WALTER A., SIEGWART R. (2015):** Beyond Point Clouds - 3D Mapping and Field Parameter Measurements using UAVs. *Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 20th. Luxembourg: IEEE; 2015
- 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. *IEEE Workshop on hyperspectral imaging and signal processing: Evolution in remote sensing*. 24-27.06.2014, Lausanne, Switzerland
- 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(1): 9
- LOTTE P., HOEFERLIN M., SANDERS S., MUETER M., SCHULZE LAMMERS P., STACHNISS C. (2016):** An Effective Classification System for Separating Sugar Beet and Weeds in Precision Farming Applications. In *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation (ICRA)*
- OTSU N. (1975):** A threshold selection method from gray-level histograms, *Automatica*, vol. 11, no. 285-296, pp. 23–27

Sensorteststand zur Evaluierung bildgebender Sensoren mit dynamisch-reproduzierbaren Störgrößen

Test bench for the evaluation of image-based sensors with dynamically reproducible noise sources

Christian Scholz, Wolfram Strothmann, Fabian Lanckenau, Daniel Schmunkamp, Fabian Sellmann, Arno Ruckelshausen

Hochschule Osnabrück, COALA, Sedanstr. 26, 49076 Osnabrück
E-Mail: c.scholz@hs-osnabruek.de

Zusammenfassung: Es wurde ein förderbandgestützter, modularer Sensorteststand für die Evaluation bildgebender Sensoren unter dem Einfluss dynamischer Störgrößen aufgebaut. Hierdurch kann die Robustheit des Einsatzes bildgebender Sensoren unter Feldbedingungen – z.B. auf Landmaschinen – erhöht werden, weiterhin können Sensoren und deren Positionierungen hinsichtlich der anwendungsspezifischen Qualitätsanforderungen verbessert werden. Für die Simulation der Einsatzverhältnisse sind die mechanischen und elektrischen Schnittstellen in der vorliegenden Beispielanwendung für den autonomen Feldroboter BoniRob ausgelegt. Ein besonderes Merkmal des Teststandes ist die Höhen- und Winkelverstellung der Sensorhalterung durch 4 Aktoren, die eine bodenabhängige Höhen- und Winkelvariationen der Sensoranordnung über den Messobjekten (z. B. Pflanzen) simulieren. Mit einer ROS-basierten Softwarearchitektur können Überfahrten sowie dynamische Schwankungen unter Laborbedingungen reproduzierbar nachgestellt werden.

Deskriptoren: Bildgebende Sensortechnik, Dynamischer Sensorteststand, Störgrößen, ROS, autonome Feldroboter

Abstract: *For the evaluation of image-based sensors with dynamically reproducible noise sources a conveyor-based modular test bench was constructed. With this test bench the use of image-based sensor can be increased under field conditions (e.g. for agricultural machines). Furthermore sensors and their positioning can be improved in terms of application-specific quality requirements. In this work the mechanical and electrical interfaces of the application are designed for the autonomous field robot BoniRob. A special characteristic of the test bench reflects the height and angle adjustment of the sensor-mounting by 4 actuators that simulate a ground-based height and angle variations of the sensor arrangement to the measurement object (e.g. plants). With a ROS-based software architecture crossings and dynamic variations can be simulated reproducibly under laboratory conditions.*

Keywords: *Image-based sensors, dynamic test bench, noise sources, ROS, autonomous field robots*

1 Einleitung

Verschiedenste Störgrößen sind bei Evaluationen bildgebender Sensoren im praktischen Feldeinsatz allgegenwärtig (HEMMING *et al.* 2001). Beispielsweise schwanken die lokalen Feldbedingungen (z. B. Sorten, Boden) wie auch die Witterung (z. B. Sonneneinstrahlung, Nässe). Ein weiterer kritischer Punkt sind mechanische Schwankungen (Vibrationen, Schocks), die beim Einsatz von Sensoren auf Fahrzeugen auf dem Acker unvermeidbar sind. Weiterhin müssen die Bewegungsgeschwindigkeiten des Systems optimiert werden (STROTHMANN *et al.* 2015). Hierbei muss sichergestellt sein, dass das System wie geplant funktioniert. Gleichzeitig muss die Zeitdauer der Messungen aus Effizienzgründen minimiert werden, was i. d. R. eine möglichst hohe Geschwindigkeit erfordert.

Dabei ist festzustellen, dass beim Einsatz von bildgebenden Sensoren im Ackerbau deutlich höhere Anforderungen an die Robustheit von bildgebenden Sensoren und Bildverarbeitungsalgorithmen gestellt werden, als beispielsweise in industriellen Prozesslinien. Dies liegt darin begründet, dass die Schwankungsbreite und Vielfalt der auftretenden Störgrößen deutlich höher sind (RUCKELSHAUSEN 2014). Weiterhin sind Feldtests von bildgebenden Sensorsystemen stets mit erheblichem organisatorischem und logistischem Aufwand sowie Planungsunsicherheiten (Witterung, Wachstumsphasen) verbunden. Entsprechend sind diese im Vergleich zu Laborversuchen deutlich teurer. Dies bedingt die Erfordernis durch vorbereitende Validierungsmaßnahmen für den Feldeinsatz bestimmte Sensorsysteme schon vor dem Feldtest intensiv zu testen. Hierzu eignen sich zum einen Simulationstechniken (LINZ *et al.* 2014) und zum anderen können dynamische Teststände im Labor eingesetzt werden (MÖLLER *et al.* 2013). Hierdurch kann der Aufwand für Feldtests vorab verringert werden.

Ein weiteres Problem stellt die schwierige Reproduzierbarkeit von Störgrößen im Feldeinsatz dar. Dies führt dazu, dass eine Störgröße, welche bei einem Feldtest einen kritischen Einfluss hatte und das System zum Ausfall oder einem nicht zufriedenstellendem Verhalten gebracht hat, bei einem anderen Feldtest gar nicht auftreten muss. Somit ist eine Validierung von Verbesserungsmaßnahmen in Bezug auf die Handhabung dieser Störgröße durch weitere Feldeinsätze nicht zwingend überhaupt möglich. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, auch Störgrößen, welche im Feldeinsatz auftreten können im Labor nachzustellen, um nach Feldtests durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen ebenfalls im Labor validieren zu können.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein dynamischer Teststand vorgestellt, mittels dessen der Einfluss von mechanischen Schwankungen (Vibrationen/Schocks) auf bildgebende Sensoren im Labor dynamisch-reproduzierbar getestet werden kann. Mechanische Schwankungen stellen im Feldeinsatz unvermeidbare Störgrößen dar. Zum einen sind

hierbei Sensoren zu betrachten, welche Pflanzen während der Überfahrt montiert auf einem Fahrzeug (z.B. Feldroboter) vermessen. Hierbei wird das gesamte Fahrzeug inkl. Sensorik stets Wankbewegungen unterliegen. Weiterhin sind auch Sensoren zu betrachten, welche innerhalb von Prozessen auf Maschinen verbaut sind und dort, z. B. vorbeigefördertes Erntegut beurteilen. Auch diese Sensoren sind aufgrund der bewegten Massen stets mechanischen Schwankungen ausgesetzt.

Weiterhin erlaubt der vorgestellte Teststand es, die simulierten Fahrgeschwindigkeiten mittels einer Programmierschnittstelle zu variieren. Dies erlaubt es das System bei verschiedenen Geschwindigkeiten automatisiert und reproduzierbar zu testen, um so die Maximalgeschwindigkeit bei der das System zuverlässig funktioniert vor dem Feldeinsatz im Labor ermitteln zu können.

Abbildung 1 zeigt eine Feldmessung durch die Verwendung eines bildgebender Sensorsystems (hier MWLP-System) und des autonomen Feldroboters BoniRob (BANGERT *et al.* 2013).



Abbildung 1: Links: Feldmessung BoniRob, Rechts: Detailansicht App

2 Material und Methoden

Nachfolgend wird auf Basis der beschriebenen Störgrößen die Konstruktion des dynamischen Teststandes mit den entsprechenden mechanischen, elektrischen und logischen Schnittstellen realisiert. Zusätzlich erfolgt die Beschreibung eines Laborversuchs, um ein entwickeltes Sensorsystem mit reproduzierbaren Störgrößen zu evaluieren.

2.1 Systemaufbau Teststand

Für eine konsistente Anwendung und Versuchsdurchführung sind die Schnittstellen (mechanisch, elektrisch und logisch) des Teststandes identisch zu den Schnittstellen des Feldroboters BoniRob. Hierdurch können entwickelte Applikationen für den BoniRob ohne Umbau in den Teststand implementiert und getestet werden. Zusätzlich können weitere Sensorsysteme durch die Verwendung eines Grundrahmens in den Teststand implementiert werden.

2.1.1 Hardwareaufbau

Die Konstruktion des Teststandes wurde mit Alu-Profilen durchgeführt. Hierbei sind die Maße zur Aufnahme der Sensor-/ Aktorapplikationen identisch mit der mechanischen Schnittstelle zum Feldroboter BoniRob. **Abbildung 2** zeigt links den mechanischen Aufbau des dynamischen Teststandes. Hierbei spiegelt der Bereich „BoniRob App“ (blau eingefärbt) die mechanische Schnittstelle zur Aufnahme der jeweiligen Applikation wider. Für eine Höhen- / Winkelverstellung sind vier Schrittmotoren an den Ecken des Teststandes implementiert. Die Linearbewegung erfolgt durch die Verwendung von Gewindespindeln. **Abbildung 2**, rechts zeigt eine detaillierte Ansicht eines Schrittmotors inklusive Gewindespindel, Encoder und Endschalter. Die Ansteuerung der Motoren erfolgt über RS485. Sämtliche elektrischen Komponenten sind in einem Schaltschrank zusammengeführt. Die Bedienung erfolgt durch die Verwendung eines Monitors sowie Maus und Tastatur. Für die Relativbewegung zwischen Sensorsystem und Objekt wird der Teststand über ein Förderband platziert, welches mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten verfahren werden kann.

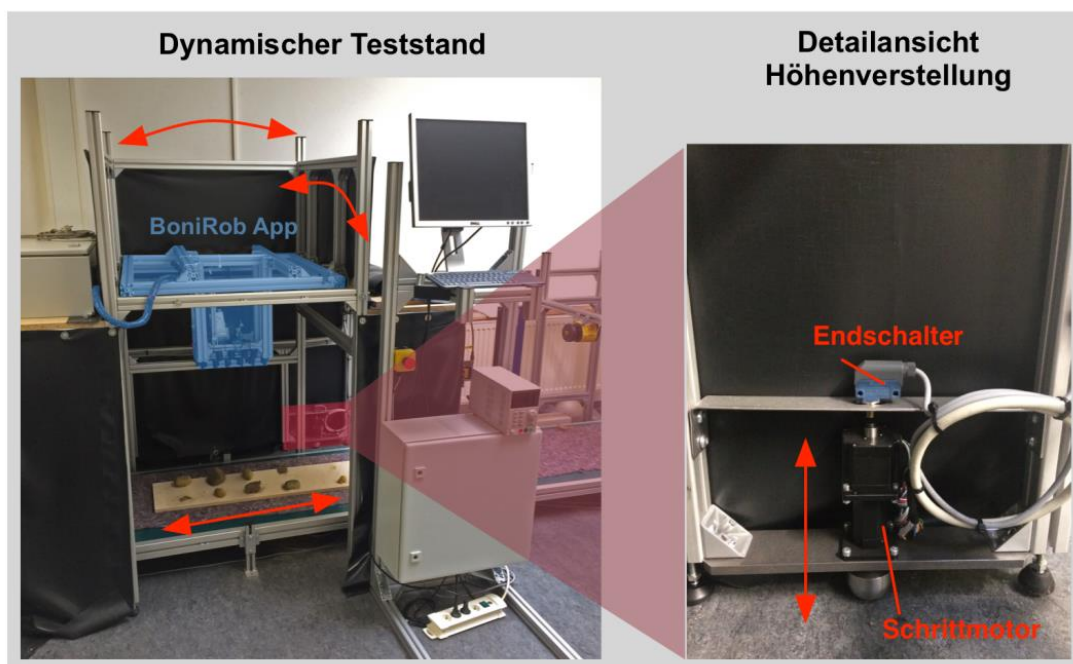


Abbildung 2: Links: Aufbau Teststand, Rechts: Detailansicht Höhenverstellung

2.1.2 Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur des Teststandes nutzt das Robotikframework ROS (www.ros.org), damit können einerseits die Systemintegration (Hardware und Simulation) und andererseits die Umsetzung auf reale Maschinen umgesetzt werden. Der Umrichter für den Antriebsmotor des Förderbandes ist via Modbus angebunden, der Drehgeber des Förderbandes über einen Arduino Microcontroller und rosserial. Die Schrittmotoren des Teststandes sind über RS485 mit dem steuernden PC verbunden. Für die Schnittstellen zu beiden Hardwareteilen sind separate ROS Knoten implementiert, die als Treiber/Controller Schnittstelle fungieren. Dies erlaubt es beiden Teilsystemen durch verschiedene Quellen von Bewegungsanforderungen über entsprechende ROS Topics zu verbinden.

Die Ansteuerung des Förderbandes kann durch die manuelle Eingaben oder konfigurierte Fahrprofile erfolgen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Ansteuerung die BoniRob-App-Schnittstelle zu nutzen. Diese bietet die Möglichkeit, dass Apps – vergleichbar mit dem Tractor-Implement-Management (TIM) – die Steuerung über das Fahrverhalten des BoniRobs in gewissen Situationen übernehmen (BANGERT *et al.* 2013). Dieses ist hier nachgestellt, indem die App über die gleiche Schnittstelle die Förderbandbewegung ansteuern kann. Weiterhin wird die App ebenfalls über die gleiche Schnittstelle mit (emulierten) Odometriedaten vom Förderband – basierend auf den Drehgeberwerten – versorgt. Die Ansteuerung des Teststandes kann durch konfigurierbare Schwankungsprofile erfolgen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, im Feldeinsatz aufgenommene Schwankungsprofile (z. B. mit Abstandssensoren am Fahrzeug oder IMU) über die entsprechende Topic auf dem Teststand abzuspielen und so im Labor zu reproduzieren. **Abbildung 3** zeigt schematisch die beschriebene Softwarearchitektur.

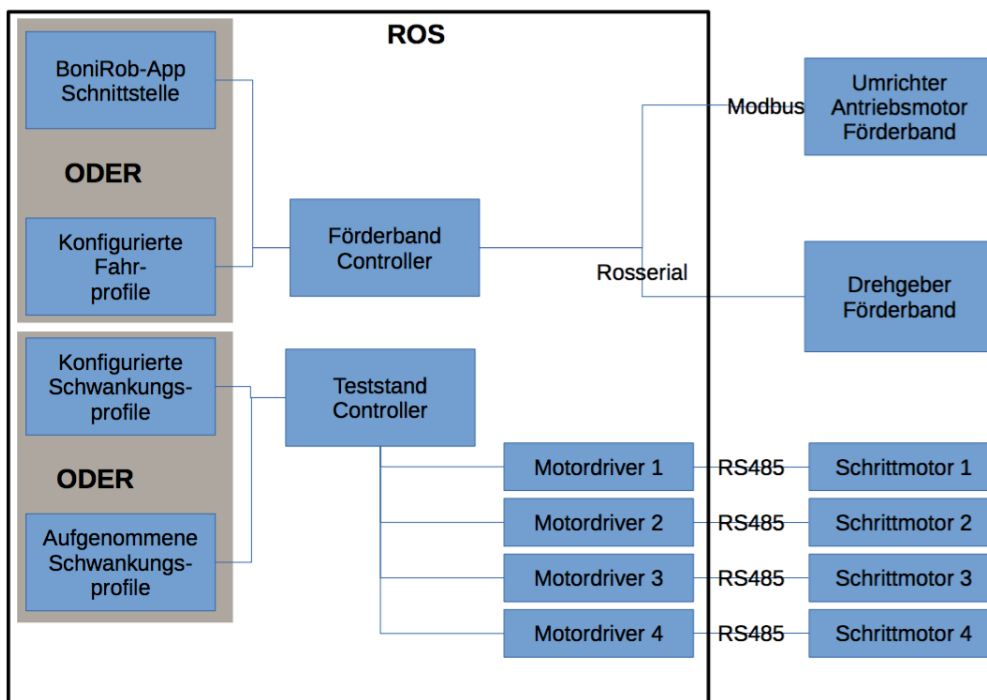


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Softwarearchitektur

2.1.3 Bewegungsprofile

Durch die Verwendung von vier Schrittmotoren (vorne links, hinten links, vorne rechts und hinten rechts), platziert in den jeweiligen Ecken des Teststandes, sind vielfältige Bewegungsprofile möglich. Ein Auszug der Profile kann aus **Abbildung 4** entnommen werden. Bei einer gleichzeitigen Ansteuerung aller Schrittmotoren mit der identischen Amplitude (Höhe) wird ein gleichzeitiger Hub durchgeführt und der Teststand bewegt sich gleichmäßig hoch und runter. Bei einer Ansteuerung der Schrittmotoren „vorne links“ und „hinten links“ sowie „vorne rechts“ und „hinten rechts“ kann der Teststand seitlich gekippt werden. Für ein „vor und zurück kippen“ werden die Schrittmotoren „vorne links“ und „vorne rechts“ sowie „hinten links“ und „hinten rechts“ angesteuert. Zusätzlich ist die Kombination der angegebenen Profile möglich, was weitere Anpassungen an die Beschaffenheit von Ackerböden und Vibrationen/ Schocks innerhalb von Prozessen garantiert.

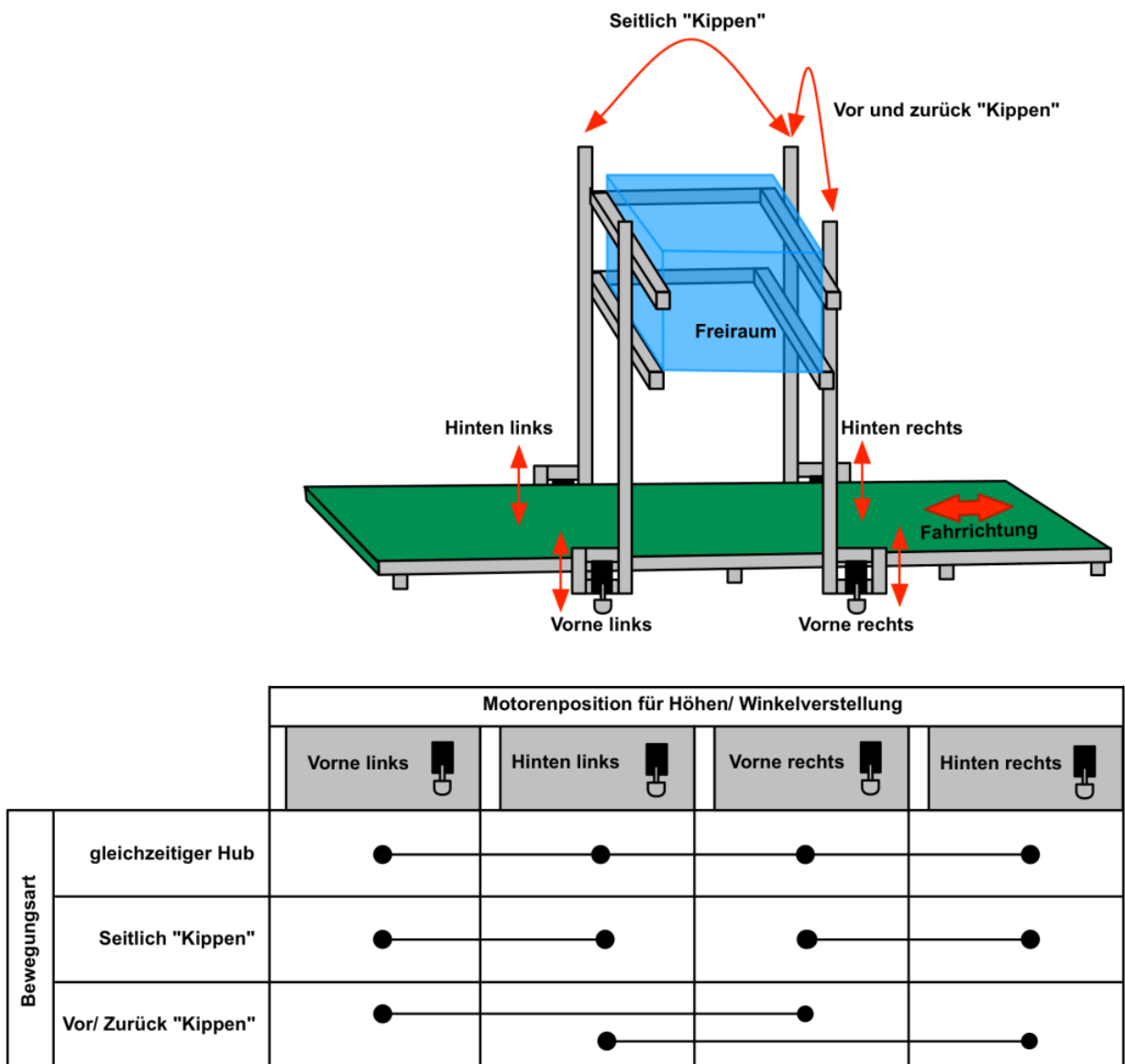


Abbildung 4: Übersicht der Höhen-/Winkelverstellungen

2.2 Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein MWLP-Sensorsystem zur Klassifizierung von Kartoffeln und Steinen/Kluten während eines Erntevorgangs simuliert (STROTHMANN *et al.* 2014). Als Anwendung wird die Unterscheidung zwischen Kartoffeln und Steinen/Kluten innerhalb der Maschine betrachtet. Hierbei werden unterschiedliche Vibrationsstärken (Oszillations-Amplituden) und Geschwindigkeiten anhand des dynamischen Teststandes reproduzierbar dargestellt, um das Sensorsystem zu evaluieren. Das MWLP-System wird zur Versuchsdurchführung in den Freiraum des Teststandes montiert und mit den definierten elektrischen und logischen Schnittstellen verbunden (siehe **Abbildung 2**).

Für die benötigten Vibrationen werden die beschriebenen Bewegungsprofile in **Abbildung 4** durch eine Zufallsauswahl ausgeführt, um die realen Gegebenheiten auf dem Acker während des Ernteprozesses deutlicher abzubilden. Zusätzlich zu den Bewegungsprofilen des Teststandes wird die Geschwindigkeit des Förderbandes schrittweise erhöht, um eine Erhöhung der Erntegeschwindigkeit zu simulieren. **Tabelle 1** zeigt die verwendeten Oszillations-Amplituden (Oscillation amplitude [mm]) für die Bewegungsprofile des Teststandes und die Geschwindigkeiten des Förderbandes (Conveyor speed [m/s]).

Tabelle 1: Parameter für Versuchsdurchführung

Oscillation amplitude [mm]	Conveyor speed [m/s]
0	0,12
3	0,21
5	0,39
10	0,74
15	1,09
20	
25	

Für die Versuchsdurchführung wird für jede Amplitude die Geschwindigkeit des Förderbandes schrittweise erhöht und die Ergebnisse der Klassifizierung evaluiert. Die Messobjekte – Kartoffeln und Steine/Kluten - sind für die Durchführung auf ein Brett geklebt und unterhalb des Sensorsystems auf dem Förderband platziert (siehe **Abbildung 2**). Innerhalb der Klassifizierung werden die Objekte, welche als Steine/Kluten vom Sensorsystem detektiert werden, rot eingefärbt. Für die Anwendung innerhalb der Maschine könnte ein nachgelagerter Prozess diese Bereiche, durch entsprechende Maßnahmen (z.B. mechanischer Ausstoß), bearbeiten. Die Ergebnisse, unter diesen reproduzierbaren Bedingungen, sollen die Grenze der mechanischen Schwankung zeigen, ab deren eine Anwendung nicht mehr möglich ist.

3 Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt einen Auszug der durchgeführten Klassifizierung bei unterschiedlichen Amplituden und Geschwindigkeiten. In **Abbildung 5a** beträgt die Amplitude 0 mm und die Geschwindigkeit des Förderbandes 0,12 m/s. Für diese Störgrößen sind alle Steine/Kluten erkannt worden. **Abbildung 5b** spiegelt die Ergebnisse der Klassifizierung bei einer Amplitude von 0 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s wider. Auch in diesem Fall wurden alle Objekte erkannt. In **Abbildung 5c** erfolgte die Klassifizierung bei einer Amplitude von 10 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s. Bei diesen Parametern wurden ebenfalls alle Objekte erkannt. Innerhalb von **Abbildung 5d**, mit einer Amplitude von 15 mm und einer Geschwindigkeit von 0,39 m/s, werden alle Objekte erkannt. Zusätzlich wurden Bereiche detektiert in denen sich kein Objekt befindet (im Bild oben). **Abbildung 5e** zeigt die Ergebnisse der Klassifizierung bei einer Amplitude von 20 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s. Eine manuelle Identifikation der Objekte ist in diesem Fall schwierig, jedoch wurden die Objekte vom Sensorsystem richtig klassifiziert. Im letzten Fall in **Abbildung 5f** bei einer Amplitude von 25 mm und einer Geschwindigkeit von 1,09 m/s wurde ein Objekt (im Bild oben rechts) nicht erkannt.

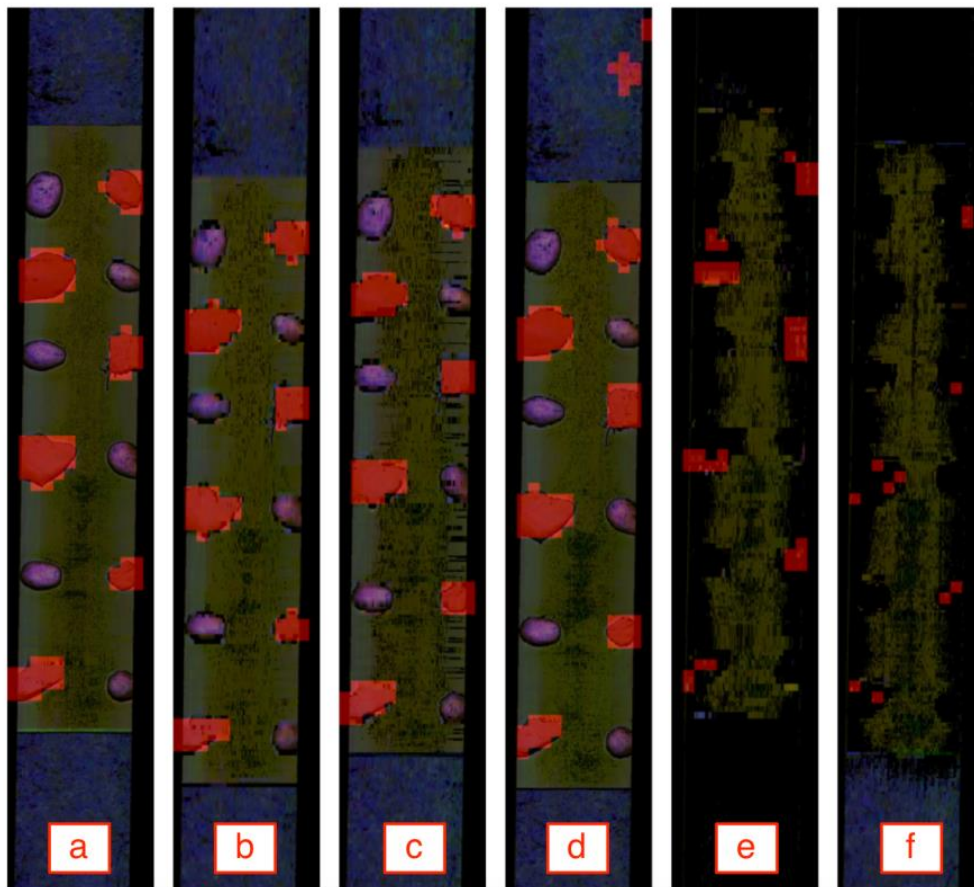


Abbildung 5: Darstellung der Klassifizierung für unterschiedliche Amplituden und Geschwindigkeiten

Tabelle 2: Ergebnisse der Klassifizierung für Kartoffeln und Steine/Kluten bei unterschiedlichen Amplituden und Geschwindigkeiten

Oscillation amplitude [mm]	Conveyor speed [m/s]	Potatoes [N objects]		Residuals [N objects]		Background [N grid cells]
		Scanned	With treating	Scanned	With treating	Treatings
0	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
3	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
5	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	24	0	24	24	0
10	0.12	18	0	18	18	0
	0.21	18	0	18	18	0
	0.39	18	0	18	18	1
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	0
15	0.12	18	0	18	18	13
	0.21	18	0	18	18	10
	0.39	18	0	18	18	22
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	18	0	18	18	5
20	0.12	18	1	18	17	0
	0.21	18	0	18	18	10
	0.39	18	0	18	17	4
	0.74	18	0	18	17	3
	1.09	18	0	18	18	0
25	0.12	18	0	18	17	4
	0.21	18	2	18	18	4
	0.39	18	0	18	17	0
	0.74	18	0	18	18	0
	1.09	36	0	36	35	28

Tabelle 2 zeigt die gesamte Versuchsdurchführung. Die ersten beiden Zeilen geben die definierten Amplituden (Oscillation amplitude [mm]) und die Geschwindigkeiten des Förderbandes (Conveyor speed [m/s]) an. Die zwei folgenden Spalten spiegeln die Anzahl der gescannten Kartoffeln und die Anzahl wie viele von diesen Kartoffeln in der Klassifizierung als Steine/Kluten erkannt wurden. Die nächsten zwei Spalten zeigen die gescannten Steine/Kluten und die Anzahl wie viele in der Klassifizierung als Steine/Kluten erkannt wurden. Die letzte Spalte zeigt die Anzahl der erkannten Objekte innerhalb der Hintergrunds (siehe hierzu **Abbildung 5e**).

Die Ergebnisse in **Tabelle 2** zeigen, dass die Erhöhung der Geschwindigkeit auf 1,09 m/s keinen großen Einfluss auf die Qualität der Klassifizierung hat. Bei einer Erhöhung der Amplituden auf 15 mm kommt es zu vereinzelt Fehlklassifizierungen innerhalb des Hintergrunds (siehe hierzu **Abbildung 5d**). Ab einer Amplitude von 20 mm kommt es zu einer Fehlklassifizierung von Kartoffeln und Steinen/Kluten.

Für die Anwendung des MWLP-Sensorsystems unter Feldbedingungen wird somit eine mechanische Sensoraufnahme innerhalb der Maschine benötigt, die keine Amplituden von mehr als 15 mm zwischen Maschine und Sensorsystem erzeugt.

4 Diskussion

Die Vorteile des dynamischen Teststandes für Evaluationen von bildgebenden Sensoren zeigen sich anhand der durchgeführten Versuchsreihe. Unter den reproduzierbaren Störgrößen – Amplitude und Geschwindigkeit – konnte die Qualität der Klassifizierung für das verwendete MWLP-Sensorsystem evaluiert werden, ohne das zeitliche- und kostenintensive Feldversuche durchgeführt werden mussten.

Der modulare Aufbau des Teststandes ermöglicht in Zukunft vielfältige Anwendungen hinsichtlich der Auswahl bildgebender Sensoren, der Abbildung von Fahrzeugmodellen, der Variabilität von Bodeneigenschaften sowie der Integration weiterer Störgrößen (z.B. variabler Lichteinfluss).

Literaturverzeichnis

- BANGERT W., KIELHORN A., RAHE F., ALBERT A., BIBER P., GRZONKA S., HAUG S., MICHAELS A., MENTRUP D., HÄNSEL M., KINSKI D., MÖLLER K., RUCKELSHAUSEN A., SCHOLZ C., SELLMANN F., STROTHMANN W., TRAUTZ D. (2013):** Field-Robot-Based Agriculture: "RemoteFarming.1" and "BoniRob-Apps", 71. Tagung LAND.TECHNIK - AgEng 2013, pp. 439-446, ISBN 978-3-18-092193-8
- HEMMING J., RATH T.(2001):** Computer-vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting. Journal of Agricultural Engineering Research, 78 (3), 2001, S.223–243
- LINZ A., HERTZBERG J., RUCKELSHAUSEN A., WUNDER E. (2014):** Autonomous Service Robots For Orchards And Vineyards: 3D Simulation Environment Of Multi Sensor-Based Navigation And Applications. In 12th International Conference on Precision Agriculture, ISPA International Society of Precision Agriculture, Ed., Sacramento, CA, USA

- MÖLLER K., SCHOLZ C., WUNDER E., RUCKELSHAUSEN A. (2013):** Sensorteststand zur Entwicklung von Sensorsystemen unter dynamisch-reproduzierbaren Testbedingungen; 33. GIL-Jahrestagung, Massendatenmanagement in der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Potsdam 2013, Tagungsband, ISBN 978-3-88579-605-3, S. 203-206
- RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen - ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. Journal für Kulturpflanzen, 66(2):73–79
- STROTHMANN W., TSUKOR V., RUCKELSHAUSEN A. (2015):** "In-Field-Labeling-HMI für automatische Klassifizierung bei der Pflanzen- und Erntegutcharakterisierung mittels bildgebender Sensordaten", in: RUCKELSHAUSEN A., SCHWARZ H.-P., THEUVSEN B. (Hsrg.): Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL Jahrestagung, 23.-24. Februar 2015, Geisenheim, S. 177-180, ISBN 978-3-88579-632-9
- STROTHMANN W., RUCKELSHAUSEN A., HERTZBERG J. (2014):** "Multiwavelength laser line profile sensing for agricultural crop characterization", Proc. SPIE 9141, Optical Sensing and Detection III, 91411K (May 15, 2014); <http://dx.doi.org/10.1117/12.2052009>

Klassifikation von Pflanzenorganen basierend auf Geometrie und Farbdeskriptoren in 3D-Punktwolken

Classification of plant organs in 3D point clouds based on geometry and color descriptors

Johann Christian Rose, Heiner Kuhlmann

*Institut für Geodäsie und Geoinformation, Professur für Geodäsie, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn, Nussallee 17, 53115 Bonn
E-Mail: rose@igg.uni-bonn.de*

Zusammenfassung: Für die Phänotypisierung ist die Bedeutung der 3D-Rekonstruktion von Pflanzen und deren Einzelorganen in den letzten Jahren stetig gestiegen. Pflanzenparameter auf Organebene, bspw. die Blattfläche oder Stammdicke, stellen wichtige Indikatoren für Monitoringaufgaben im Kontext von Wachstumsprognosen oder der Analyse von Stressverhalten dar. Für die genaue Rekonstruktion steht dem Anwender eine Vielzahl flächenhafter und berührungslos messender Verfahren mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung. Neben hochpräzisen, jedoch stationären und kostenintensiven Laserscannern stellen bildbasierte Multi-View-Stereo (MVS) eine kostengünstige und flexible Methode für die 3D-Rekonstruktion dar und erlangen immer größere Popularität.

Die z.Z. noch weitestgehend manuelle Trennung der jeweiligen Pflanzenorgane in der Punktwolke für die Parametrisierung ist jedoch zeitintensiv und subjektiven Entscheidungen des Anwenders unterlegen. Insbesondere für die Belange der Hochdurchsatzphänotypisierung sind daher automatisierte Klassifikationsalgorithmen notwendig, um die einzelnen Punktwolken objektiv und zeitsparend in die jeweiligen Einzelorgane zu trennen.

In der vorliegenden Studie wird eine Pipeline zur automatisierten Klassifikation von Pflanzen aus farbigen Punktwolken vorgestellt. Mehrere Tomatenpflanzen sowie Weinstöcke wurden dafür unter Gewächshaus- bzw. Feldbedingungen über ein bildbasiertes Multi-View-Stereo Verfahren rekonstruiert. Basierend auf dem Punktdeskriptor CSHOT, der sowohl die benachbarte Geometrie als auch die Farbumgebung eines Punktes in einem Histogramm beschreibt, erfolgt die Zuweisung der Punkte in die Klassen der Einzelorgane automatisiert mittels inkrementeller kernel-basierter Import-Vector-Machines. Eine Verbesserung der Klassifikationsergebnisse erfolgt im Anschluss über eine graphenbasierte Energieminimierungsfunktion innerhalb eines Conditional-Random-Fields Ansatzes, welcher die Nachbarbeziehungen der Punkte ausnutzt.

Die Pipeline stellt eine neuartige Methode zur automatischen Klassifikation von Pflanzen dar. Durch die Nutzung des sowohl geometrie- als auch farbbasierten Deskriptors ist sie deskriptiver gegenüber bisherigen, lediglich die Geometrie nutzenden Methoden, da Objekte mit ähnlicher Geometrie jedoch unterschiedlicher Farbe distinktiver beschrieben werden können. Sie empfiehlt sich daher speziell für farbgebende Rekonstruktionsmethoden. Unter Ausnutzung der probabilistischen Ergebnisse der Import-Vector-Machines können komplexere graphische Methoden als einfaches Region Growing zur Verbesserung der Klassifikation herangezogen werden. Die Anwendung unter Labor- wie Feldbedingungen gibt einen ersten Eindruck über die möglichen Einsatzbereiche des Ansatzes und eröffnet Konzeptionspotentiale für künftige Phänotypisierungssysteme.

Deskriptoren: Automatische Klassifikation, 3D-Rekonstruktion, Farbe, Geometrie, Features, CRF, IVM, CSHOT, Phänotypisierung, Hochdurchsatz

Abstract: *The importance of 3D-reconstruction methods for plant phenotyping has grown significantly in the last few years. Plant parameters on the organ level e. g. leaf area or main stem diameter constitute important indicators for growth monitoring tasks or stress level evaluation. A variety of non-invasive area-based reconstruction methods with varying measurement properties are available. Apart from high-precision, but stationary and high-cost laser scanners Multi-View-Stereo approaches pose a flexible and low-cost method for 3D-reconstruction and gain in popularity. Manual differentiation between semantic plant organs by an operator is time-consuming and subjective. In high-throughput phenotyping approaches automatic classification of the raw point cloud data into semantic plant components is therefore of key importance. In this study a pipeline for the automatic classification of colored point clouds is presented. Several tomato plants as well as vineyard trellis were reconstructed under laboratory respectively field conditions using an MVS approach. Based on the local feature descriptor CSHOT which describes the geometry as well as color of a given points neighborhood in a histogram the classification of individual points is realized using incremental kernel-based Import-Vector-Machines. The initial classification results are smoothed using a graph-based energy minimization function within a Conditional-Random-Fields approach using the neighborhood relation of the points.*

The pipeline constitutes a new method for the automatic classification of plants. Using geometry as well as color for the generation of the feature descriptor renders the method more descriptive compared to methods using only geometry features. Objects with similar geometry but diverging color are described more distinctively, making the method especially suitable for colored point clouds. The probabilistic output of the IVMs can be used as an energy function which can be used within more sophisticated methods than just simple region growing. Its demonstration under controlled resp. field conditions reveals the methods potential for the design of future phenotyping systems.

Keywords: *automatic classification, 3D-reconstruction, color, geometry, features, CRF, IVM, CSHOT, phenotyping, high-throughput*

1 Einleitung

Die Erfassung der 3D-Geometrie von Pflanzen ist für die Phänotypisierung von großer Bedeutung. Traditionelle Methoden der Datenerhebung sind jedoch oftmals subjektiv, invasiv und erzeugen nur eine geringe Datenmenge. Dieser Umstand wird als sog. „Phänotypisierungs-Flaschenhals“ (FURBANK & TESTER 2011) bezeichnet. In den letzten Jahren versucht die Forschung diesen durch die Konstruktion automatischer Systeme zu überwinden, um eine ausreichend hohe Datenmenge für die Erstellung des Phänotyps zu erlangen. Dabei finden verstärkt Methoden zur 3D-Rekonstruktion von Objekten ihren Einsatz. Methoden wie Laserscanning (DORNBUSCH *et al.* 2012), Time-of-Flight (ToF)-Kameras (KRAFT *et al.* 2010, KIZMA *et al.* 2012) oder Structured-Light Ansätze (PAULUS *et al.* 2014a) eröffnen neue Möglichkeiten der 3D-Phänotypisierung, indem Pflanzenparameter wie Blattfläche oder Stammhöhe nicht-invasiv aus den Punktwolken zu Wachstumsanalysen oder Stresslevel-Abschätzungen (OMASA *et al.* 2007) abgeleitet werden können. Insbesondere Nahbereichsscanning (PAULUS *et al.* 2014b) liefert hochpräzise und vollständige Rekonstruktionen von Pflanzen in Echtzeit mit einer Punktauflösung von wenigen 10 μm . Die Methode ist jedoch stationär und mit hohen Anschaffungskosten verbunden. Low-cost Systeme (PAULUS *et al.* 2014a) sind kostengünstig, besitzen jedoch eine vergleichsweise geringere Genauigkeit. Durch die Zunahme von Speicher- und Rechenkapazitäten und die weite Verbreitung digitaler Kameras sind Bildverarbeitungsmethoden basierend auf Structure-from-Motion (SfM) (HARTLEY & ZISSERMAN 2004) und Multi-View-Stereo (MVS) (SEITZ *et al.* 2006, REMONDINO *et al.* 2014) eine kostengünstige und flexible Alternative zu Laserscannern geworden, die sich bzgl. des Vollständigkeitsgrades der Rekonstruktion und der Genauigkeit der Parameterbestimmung auf Organebene als ebenbürtig gegenüber hochpräzisen Methoden erweisen (ROSE *et al.* 2015). Des Weiteren besitzen sie das Potential zur Umsetzung automatisierter multiperspektivischer Scansysteme, um Objekte vollständig in einer einzigen Zeiteinheit zu erfassen (WEINMANN *et al.* 2011).

Ein weiterer wichtiger Automatisierungsschritt ist, die so entstandene Punktwolke in semantische Objekte wie Blatt, Ast oder Traube zu differenzieren, um die Notwendigkeit einer manuellen Unterteilung durch einen Anwender zu verringern. PAULUS *et al.* (2013) scannen Weinreben und Weizenähren mit einem hochpräzisen Nahbereichsscanner. Die geometrischen Oberflächenmerkmale der Punktwolke werden mit dem lokalen Punkt-Deskriptor Surface Feature Histograms (SFH) beschrieben und anhand von Support-Vector-Machines (SVM) in Stamm und Blatt bzw. Ähre klassifiziert. Sie erreichen dabei Klassifikationsgenauigkeiten von >96%. SANTOS *et al.* (2012) nutzen einen SfM/MVS Ansatz, um farbige Punktwolken von Basilikum und Ixorapflanzen zu generieren. Die Blätter der Pflanzen werden anschließend mit Spektralem Clustering erfolgreich differenziert, jedoch muss die Anzahl der Blätter für das Clustering anhand von

A-priori-Wissen vorab festgelegt werden. Eine SfM/MVS Methode wird ebenfalls in PA-PROKI *et al.* (2012) genutzt, um Baumwollpflanzen dreidimensional zu rekonstruieren und zu vermaschen. Sequentielles Region Growing, Shape Fitting Algorithmen und planare Symmetrieverhältnisse werden in einer vierstufigen Segmentierungsmethode kombiniert, um die Pflanzen in Blatt und Stamm zu unterteilen.

Die Idee, lokale geometriebasierte Punktdeskriptoren für die Klassifikation zu nutzen, wurde bereits in RUSU *et al.* (2008) und BEHLEY *et al.* (2012) umgesetzt. Bei den zu klassifizierenden Objekten handelte es sich jedoch primär um geometrische Primitive (Ebenen, Zylinder etc.) in kontrollierten Szenen. Erst PAULUS *et al.* (2013) demonstrieren anhand der SFHs, dass lokale Deskriptoren auch zur Klassifikation von natürlichen Objekten wie Pflanzenorganen geeignet sind. Die hier vorgestellte Pipeline greift den generellen Ansatz von PAULUS *et al.* (2013) auf und erweitert ihn um die Anwendung bei farbigen Punktwolken von geringerer Genauigkeit als die mit Nahbereichsscanning erreichbare Genauigkeit. Während farbbasierte Merkmale Schwächen bei wechselnden oder ungleichen Lichtverhältnissen aufweisen, ist die Effizienz geometriebasierter Merkmale von der geometrischen Exaktheit der rekonstruierten Objekte abhängig. Eine Kombination beider Merkmale erscheint daher sinnvoll, um ihre jeweiligen Schwächen zu kompensieren. Wir stellen Klassifikationsuntersuchungen an Pflanzen unterschiedlicher Komplexität und Rekonstruktionsgenauigkeit vor, welche aus Labor- wie auch Feldbedingungen mittels MVS Verfahren rekonstruiert wurden. Die Ergebnisse demonstrieren eine erhöhte Klassifikationsgüte gegenüber einem rein geometriebasierten Deskriptor, zeigen aber auch die Abhängigkeit des Ansatzes von der geometrischen Exaktheit der Punktwolke, Objektdichte und der Objektgeometrie auf.

2 Datengrundlage und Methodik

2.1 Datenakquise und Vorbereitung der Punktwolken

Dreidimensionale Punktwolken von fünf Tomatenpflanzen, sowie Ausschnitte einer Weinrebenreihe wurden mittels der kommerziellen MVS-Software Pix4Dmapper (Pix4D SA, 1015 Lausanne, Schweiz) erstellt. Die Tomatenpflanzen wurden im Frühjahr 2014 unter identischen Laborbedingungen mittels der handelsüblichen Spiegelreflexkamera Canon EOS 450D von Hand bildlich erfasst (ROSE *et al.* 2015). Die Pflanzen konnten durch eine umschließende Aufnahmetrajektorie verdeckungsfrei rekonstruiert werden

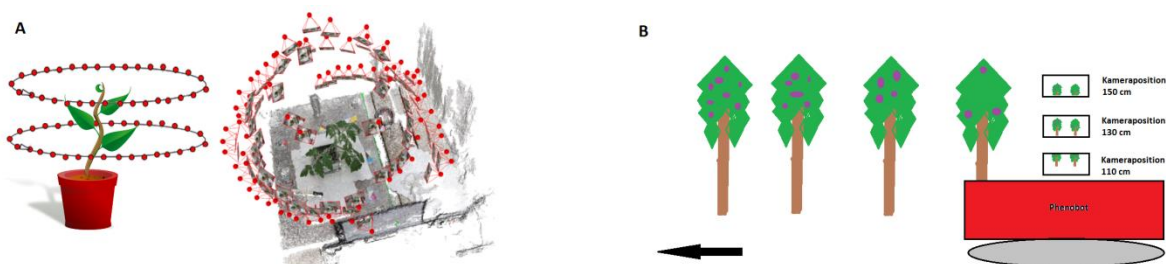


Abbildung 1: Aufnahmetrajektorien für Tomaten und Weinreihen,
(Grafik (A) aus ROSE *et al.* 2015)

(**Abbildung 1 A**). Die Weinrebenreihen wurden im Sommer des Jahres 2015 mittels des RGB-Kamerasystems der mobilen Sensorplattform PHENObot (KICHERER *et al.* 2015) erfasst. Der PHENObot bewegte sich dabei zwischen zwei Weinrebenreihen, das Kamerasystem zeigte auf die in Fahrtrichtung rechts liegende Laubwand. Daher wird eine Weinrebenreihe lediglich von einer Seite aufgenommen. Die Aufnahme geschah nachts, wobei ein mit dem Auslöser synchronisierter Blitzrahmen homogene Lichtverhältnisse in jeder Aufnahme schuf. Jede Laubwand wurde insgesamt dreimal mit unterschiedlichen Kamerahöhen durchfahren, um eine vollständige Abdeckung der Weinreihe zu gewährleisten (**Abbildung 1 B**). Aus der rekonstruierten Punktwolke werden zwei Ausschnittsbereiche betrachtet. Ausschnitt 1 stellt einen blattgestützten, luftigen Abschnitt dar, Ausschnitt 2 enthält hingegen Blätter, Äste und Trauben.

Beide Punktwolken enthalten komplexe Objekte, deren wahre Geometrie entweder nur grob aufgelöst werden konnte oder die vielfältige Formen und Farben annehmen können, bspw. Äste und Stamm der Tomaten und das Laubwerk der Weinreben. Wir berei-

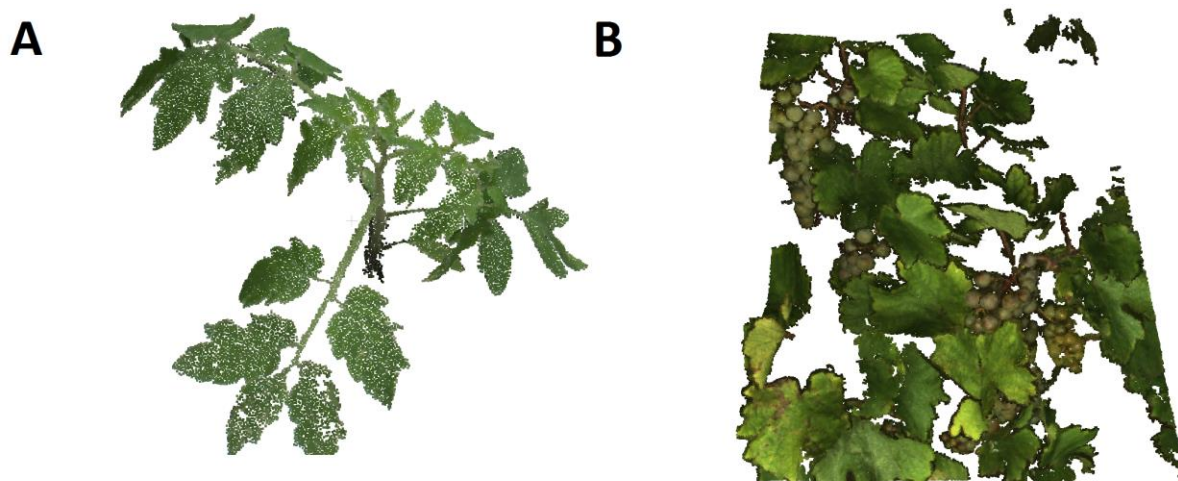


Abbildung 2: Originale Punktwolken für Tomaten (A)
und Ausschnitt 2 der Weinreben (B)

nigen die Punktwolken vor der Klassifikation, um ihre geometrische Genauigkeit zu erhöhen. Die Punktwolken wurden mittels der Software Geomagic Studio 12 (Raindrop Geomagic Inc., Morrisville, NC, USA) manuell von Ausreißern und irrelevanten Objekten bereinigt. Sie wurden anschließend mittels eigener Softwareroutinen farbgefiltert, um Mischpixel an Objekträndern zu entfernen. Mittels der Open Source Software CloudCompare (<http://danielgm.net/cc/>) bereinigten wir die Punktwolken anschließend semiautomatisch von verbliebenen Ausreißern und isolierten Punktregionen unterhalb einer gewissen Pixelanzahl mittels einer Connected-Components-Methode. Im Anschluss werden zufällige Abweichungen durch ein Moving-Least-Squares (MLS) Verfahren reduziert. Wir verringern die Punktdichte zuletzt auf einen gleichmäßigen Punktabstand von 1 mm. **Abbildung 2** zeigt exemplarisch eine Tomate und Ausschnitt 2 der rekonstruierten Weinreihe. Die Tomaten bestanden aus durchschnittlich 30.000 Punkten, die Weinreihenausschnitte aus ca. 90.000 Punkten.

2.2 CSHOT: Oberflächengeometrie- und Farbmerkmale

Zur Klassifikation müssen die verschiedenen Klassen durch Merkmale beschrieben werden. Jeder Punkt besitzt zunächst lediglich die Koordinaten X, Y, Z als Merkmale. Diese sind jedoch für eine Klassifikation von komplexen Objekten wie Pflanzen unzureichend. Wir nutzen daher den lokalen Punkt-Deskriptor CSHOT (TOMBARI *et al.* 2011), um jedem Punkt weitere Merkmale zuzuweisen. Wir nutzen die Implementation in der *Point Cloud Library* (<http://pointclouds.org/>). Zunächst werden alle Nachbarn, die in einem Umkreis von r_N um einen zu betrachtenden Quellpunkt liegen, zur Normalenberechnung mittels Hauptkomponentenanalyse herangezogen. Die Normale jedes Punktes wird auf diese Weise berechnet. CSHOT berechnet anschließend iterativ für jeden Punkt die schließlichen Merkmale. Dafür werden die Nachbarn eines betrachteten Quellpunktes in einem Umkreis r_H herangezogen. Der Winkel zwischen der Normalen eines Nachbarn und der Normalen des Quellpunktes wird berechnet. Dies geschieht für alle Nachbarpunkte. Farbe von Quellpunkt und Nachbarpunkt wird über Anwendung der L1-Norm im Farbraum verglichen. Alle Informationen über die Oberflächengeometrie, sowie die Farbe werden zuletzt in einem Histogramm mit 1344 Bins codiert. Dabei beschreiben die ersten 352 Bins die Geometrie und die übrigen Bins die Farbe. Das Histogramm wird zuletzt dem Quellpunkt zugewiesen. **Abbildung 3** skizziert diesen Vorgang. Charakteristische Oberflächengeometrie und Farbe verschiedener Klassen resultieren in distinktiven Histogrammen, die als Klassenmerkmale mittels Machine-Learning zur Klassifikation genutzt werden können.

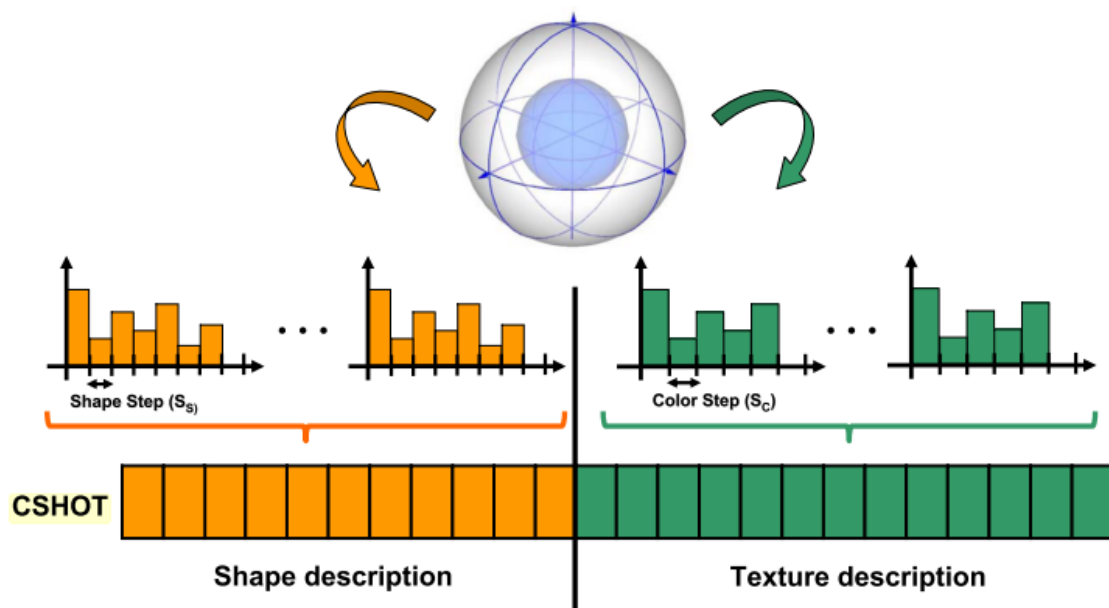


Abbildung 3: Berechnung und Belegung der CSHOT Histogramme
(Grafik aus TOMBARI *et al.* 2011)

2.3 Referenz- und Trainingsdaten

Für die Tomaten wählten wir die Klassen „Blatt“ und „Stamm“, für die Weinreben „Laub“ und „Traube“ aus. „Stamm“ umfasst Stamm und Äste, „Laub“ Blätter und Äste. Punkte einer jeden Klasse wurden aus unabhängigen eigens ausgesuchten Trainingsdaten

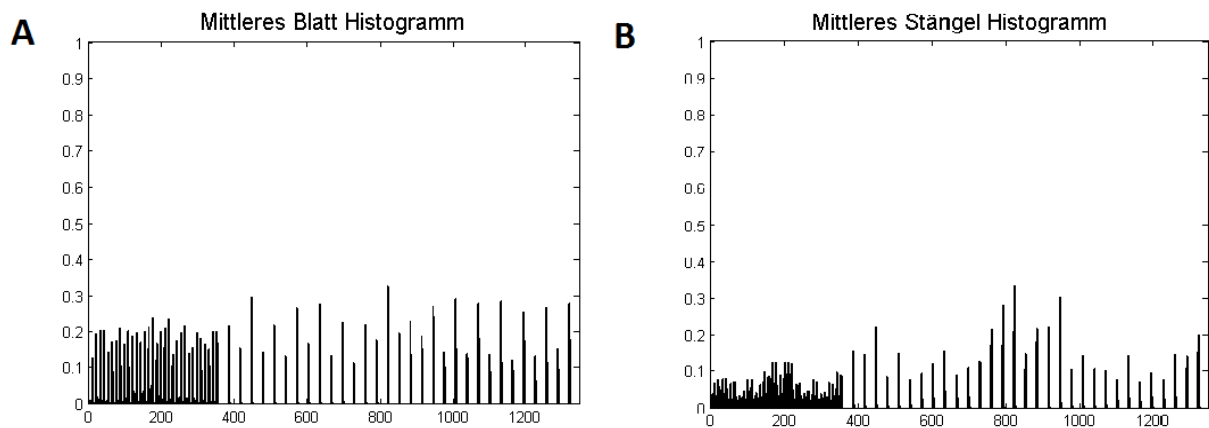


Abbildung 4: Mittlere Klassenhistogramme für Blatt (A) und Stamm (B)

manuell in Geomagic separiert. Die Menge der Trainingsdaten pro Klasse wurde dabei möglichst gleich groß gehalten, um eine Überanpassung des Modells an die größere Trainingsmenge zu verhindern. Die Merkmale der ausgesuchten Trainingsdaten wurden im Anschluss mit CSHOT berechnet und zur Generierung des Klassifikationsmodells mit IVM herangezogen. Referenzdaten zur Genauigkeitsvalidierung wurden auf gleiche Weise erzeugt, indem wir sämtliche zu klassifizierenden Punktwolken vollständig in ihre Klassen separierten und allen Punkten der jeweiligen Klasse zuwiesen. **Abbildung 4** zeigt exemplarisch zwei Histogramme für die Klassen „Blatt“ und „Stamm“ einer Tomatenpflanze. Die Belegung der Histogrammbins unterscheidet sich für beide Klassen deutlich.

2.4 Klassifikation mit Import-Vector-Machines

Zur Klassifikation verwenden wir inkrementelle Import-Vector-Machines (ROSCHE *et al.* 2012) in einer frei verfügbaren Matlab Software (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA). IVMs sind direkt auf den Multiklassen-Fall anwendbar und hinsichtlich ihrer Effizienz gleich- oder höherwertig wie die häufig verwendeten SVMs (BRAUN *et al.* 2011). Basierend auf Kernelfunktionen wird ein diskriminatives probabilistisches Modell zur Differenzierung der Klassen erzeugt. Ergebnis der Klassifikation eines Quellpunktes x sind Konfidenzwerte (A-Posteriori Wahrscheinlichkeiten) $x = (P_1 \dots P_i), i = \#Klassen$ für die Zugehörigkeit des Punktes zu allen Klassen. Ein Punkt wird schließlich derjenigen Klasse mit der höchsten Konfidenz zugewiesen. IVMs unterscheiden sich darin von den SVMs, die direkte Klassenzuweisungen vornehmen und lediglich Pseudo-Wahrscheinlichkeiten (PLATT 2000) erzeugen können.

2.5 Klassenglättung mit Conditional-Random-Fields

Die Klassifikation mit IVMs geschieht individuell für jeden Punkt, ohne kontextuelle Beziehungen zu nutzen. Dadurch entstehen heterogen klassifizierte Regionen. Benachbarte Punkte stehen jedoch miteinander in Beziehung und gehören wahrscheinlich derselben Klasse an. Conditional-Random-Fields (CRF) sind ungerichtete graphische Modelle, in welchen diese lokalen Beziehungen bei der Klassifikation mitberücksichtigt werden. Wir nutzen die Implementation GCO von DELONG *et al.* (2010) zur räumlichen Glättung der initialen Klassifikationsergebnisse aus den IVMs. Ein Quellpunkt und seine Nachbarn in einem festgelegten Radius bilden die verbundenen Knoten eines Graphen, wobei jedem Knoten ein Datenkostenterm zugeordnet ist, welcher den Konfidenzwerten der Klassenzugehörigkeit entspricht. Zudem werden sog. Glättungskosten definiert, welche die Änderung einer Klasse zu anderen Klassen sanktionieren. Datenkosten der Punkte der betrachteten Nachbarschaft und Glättungskosten addieren sich zu einer Energiefunktion, welche GCO minimiert. Durch die Glättung entstehen homogene Klassenregionen, die Klassifikationsgenauigkeit wird erhöht.

3 Ergebnisse und Diskussion

Optimale Radien r_N und r_H für die Berechnung der CSHOT-Merkmale wurden über Kreuzvalidierung ermittelt. Wir nutzen die Metriken „Recall“ und „Präzision“ zur Evaluierung der Klassifikationsergebnisse. Sie berechnen sich nach folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \text{Präzision:} & \quad \frac{\#True\ Positive}{\#True\ Positive + \#False\ Positive} \quad , \\ \text{Recall:} & \quad \frac{\#True\ Positive}{\#True\ Positive + \#False\ Negative} \quad , \end{aligned}$$

wobei „True Positive“ Übereinstimmung von wahrer und zugewiesener Klasse 1 bezeichnen, „False Positive“ hingegen eine Zuweisung zur Klasse 1, obwohl die wahre Klasse eine andere ist und „False Negative“ die inkorrekte Zuweisung eines Punktes der wahren Klasse 1 zu einer anderen Klasse. „Recall“ bezeichnet also den Anteil gefundener Punkte an der wahren vorhandenen Menge einer Klasse. Die Präzision beschreibt den Anteil korrekt einer Klasse zugewiesenen Punkte an der Menge aller Punkte, die dieser Klasse zugeordnet wurden.



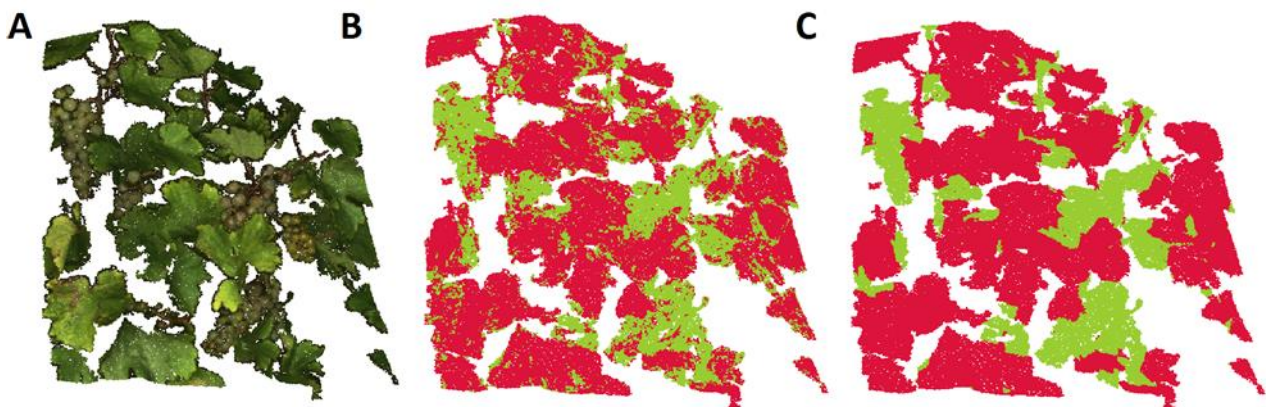
Abbildung 5: Originale Daten einer Tomate (A), initiale Klassifikationsergebnisse (B) und finale Klassen nach der Glättung (C). Rot korrespondiert mit „Blatt“, Grün mit „Stamm“.

Tabelle 1 zeigt die Klassifikationsresultate für alle fünf Tomatenpflanzen auf. Die initiale Klassifikation der fünf Tomatenpflanzen erreicht danach einen durchschnittlichen Recall von 86% und eine durchschnittliche Präzision von 68%. Während die Klasse „Blatt“ initial durchgehend hohe Präzisionswerte von ~98% aufweist, liegt ihr Recall etwas niedriger bei durchschnittlich 82%. Die Klasse „Stamm“ erreicht initial einen vergleichsweise hohen Recall von 91%, jedoch ist ihre Präzision mit 38% sehr gering.

Nach der Glättung der Ergebnisse (**Abbildung 5 B & C**) erhöhen sich die Durchschnittswerte für Recall und Präzision auf 91% bzw. 80%. Der Recall der Klasse Stamm verringert sich jedoch um rund 3 Prozentpunkte auf rund 87%. Ihre Präzision kann jedoch um knapp 25 Prozentpunkte auf durchschnittlich 62% gesteigert werden. Der Recallverlust resultiert vor allem aus Regionen, wo Blatt und Stamm dicht beieinander liegen oder die Blätter sehr klein sind. Die voluminösere Punktverteilung am Stamm wird bei der Vorbereitung der Punktwolken durch die MLS-Glättung verebnet, wodurch sich die Klasse „Stamm“ geometrisch vom „Blatt“ nur noch durch Farbe und Breite abheben kann. An besagten Regionen verschwimmen diese Unterschiede. Insbesondere bei der Nachbarschaftsbetrachtung in GCO führt die Nähe beider Klassen zu einer Überglättung. Dies ist in erster Linie ein Problem der Rekonstruktion, bei der die distinktive zylindrische Form von Stamm und Ästen nicht aufgelöst werden konnte.

Tabelle 1: Recall und Präzision für fünf Tomatenpflanzen vor und nach der Klassenglättung

	Recall [%]	Precision [%]	Recall smooth [%]	Precision smooth [%]
Tomate 26				
Blatt	82,6	97,2	94,2	96,8
Stamm	79,4	34,4	73,5	60,0
Tomate 27				
Blatt	80,9	98,1	95,2	99,1
Stamm	91,5	35,5	92,8	68,1
Tomate 28				
Blatt	77,4	99,3	89,9	99,1
Stamm	95,6	34,8	93,0	51,8
Tomate 29				
Blatt	81,7	99,3	95,0	98,6
Stamm	94,6	36,5	87,7	64,9
Tomate 30				
Blatt	86,0	98,2	94,5	98,7
Stamm	92,5	47,0	89,8	66,7
<i>Mittel Blatt</i>	81,7	98,4	93,8	98,5
<i>Mittel Stamm</i>	90,7	37,6	87,4	62,3
<i>Mittel Gesamt</i>	86,2	68,0	90,6	80,4

**Abbildung 6:** Originale Daten der Weinrebe aus Ausschnitt 1 (A), initiale Klassifizierungsergebnisse (B) und finale Klassen nach der Glättung (C). Rot korrespondiert mit „Laub“, Grün mit „Traube“.

Die initiale Klassifikation der Weinreben erreicht einen durchschnittlichen Recall von 80% und 71% für die Präzision. Nach der Glättung steigern sich die Werte auf 86% bzw. 77%. Die Präzision der Klasse „Traube“ erhöht sich um rund 9 Prozentpunkte auf

59% (s. **Tabelle 2**) und ist damit bedeutend niedriger als die Erhöhung im Falle der Tomaten. Eine Steigerung auf 81% erfährt auch der Recall der Klasse „Laub“. Es fällt auf, dass der Recall der Klasse „Traube“ um 10 Prozentpunkte höher liegt, als der der Klasse „Laub“ und damit deutlich überschätzt wird. Es war zu erwarten, dass insb. die ebene Geometrie und die distinktive Färbung der Blätter, wie auch die braune Färbung der Äste zu einem deutlichen Merkmalsunterschied im Vergleich zu Trauben führt. Offenbar ergeben sich jedoch bzgl. der Farbe Ähnlichkeiten zwischen Trauben und Ästen, die zu einer Überschätzung der Klasse „Traube“ führen und durch den geometrischen Unterschied beider Klassen nicht vollständig kompensiert werden können. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Tabelle 2: Recall und Präzision der Weinreihenausschnitte vor und nach der Klassenglättung

	Recall [%]	Precision [%]	Recall smooth [%]	Recision smooth [%]
Ausschnitt 1				
Laub	74,1	88,7	79,1	91,7
Traube	84,0	65,6	87,9	71,2
Ausschnitt 2				
Laub	75,8	96,6	82,8	99,1
Traube	83,0	34,8	95,1	46,3
<i>Mittel Laub</i>	75,0	92,7	81,0	95,4
<i>Mittel Traube</i>	83,5	50,2	91,5	58,8
<i>Mittel Gesamt</i>	79,2	71,4	86,2	77,1

CSHOT schneidet im Vergleich mit den ausschließlich geometriebasierten Deskriptoren SHOT (TOMBARI *et al.* 2010) und FPFH (RUSU *et al.* 2009) besser ab. Für Tomate #26 ergibt sich mit SHOT nach der Glättung mit GCO ein Recall von 92% bzw. 75% für die Klassen „Blatt“ und „Stamm“. Die Präzision beträgt 97% bzw. 53% (vgl. **Tabelle 1**). Bei der Klassifikation des Weinreihenausschnitts 2 mit SHOT ergibt sich nach der Glättung ein Recall von 80% bzw. 92% für „Laub“ bzw. „Traube“ und eine Präzision von 99% und 43% (vgl. **Tabelle 2**). Mit FPFH wird für Tomate #26 nach der Glättung ein Recall von 77% bzw. 92% für „Blatt“ und „Stamm“, sowie eine Präzision von 98% bzw. 34%. Für den Weinreihenausschnitt 2 ergibt sich für die Klassen „Laub“ und „Traube“ ein Recall von 93% bzw. 71% und eine Präzision von 99% bzw. 33%. Die initiale Klassifikation mit CSHOT ist deutlich sensibler für Unsicherheiten in der Klassifikation, was vermutlich auf die höhere Deskriptivität der CSHOT-Merkmale durch Einbeziehung der Farbinformation zurück zu führen ist. **Abbildung 7** demonstriert diesen Zusammenhang. **A** und **B** illustrieren eine nach den höchsten initialen Konfidenzen farbcodierte Tomatenpunkt- wolke, im Folgenden Heatmap genannt.

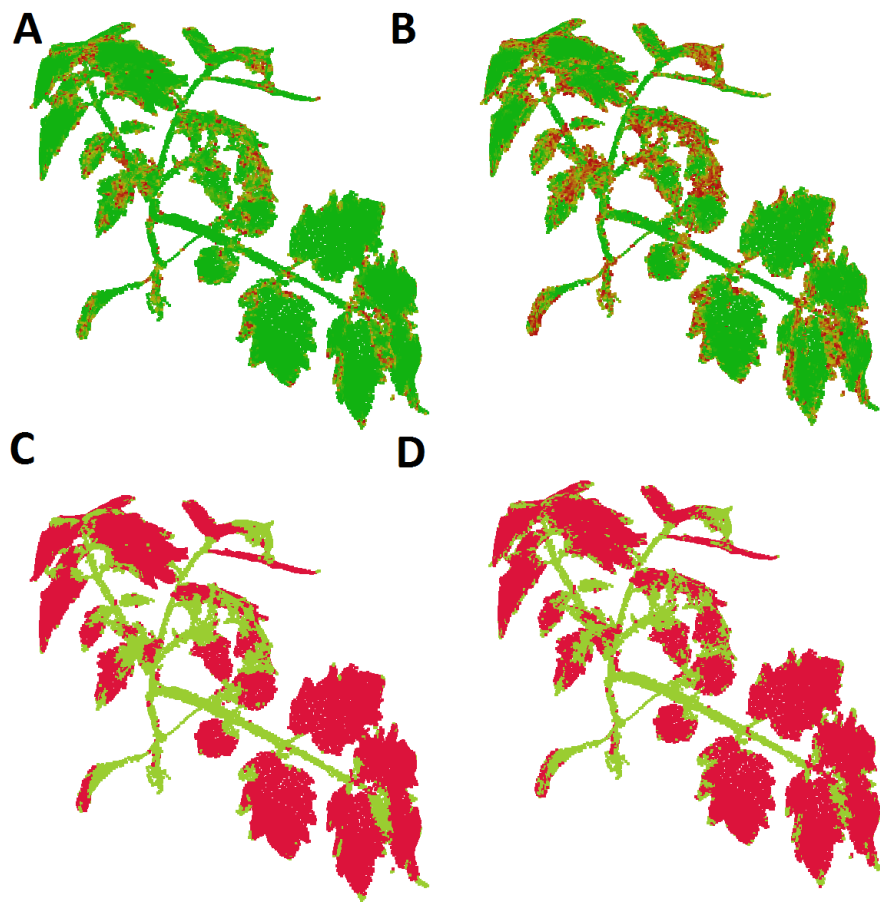


Abbildung 7: Heat Maps der höchsten Konfidenzen mit SHOT / CSHOT (A, B) und initiale Klassifikationsergebnisse (C, D)

Rote Töne korrespondieren dabei mit einer niedrigen, gelbe mit einer mittleren und grüne mit einer hohen Konfidenz. **C** und **D** zeigen die initialen Klassenzuweisungen bei SHOT bzw. CSHOT. Während die initialen Klassenzuweisungen zwischen SHOT und CSHOT kaum Unterschiede aufweisen, korrespondieren die geringen Konfidenzen bei CSHOT mit falsch klassifizierten Punkten, während SHOT auch bei falsch klassifizierten Punkten in den meisten Fällen hohe Konfidenzen aufweist. Konfidenzen mit CSHOT können daher als verlässlicher betrachtet und zur Identifikation falscher oder unsicherer Klassenzuweisungen genutzt werden.

GCO nutzt die probabilistischen Konfidenzen der IVMs als zu minimierende Energiefunktion. Je höher die Konfidenz der Zuweisung eines Punktes und seiner Nachbarn zur Klasse *a* ist, desto eher wird ein ebenfalls in dieser Nachbarschaft liegender Punkt der Klasse *b*, der jedoch eine niedrigere Konfidenz besitzt, durch GCO der Klasse *a* zugeordnet. **Abbildung 8** demonstriert diesen Zusammenhang anhand einer Tomatenpflanze. **Abbildung 8 A** zeigt eine Heatmap der höchsten initialen Konfidenz des Punktes. In **B** werden die initialen Klassen dargestellt. In **A** befinden sich links an im unteren Bereich viele Punkte der wahren Klasse „Blatt“ mit initialer Klasse „Stamm“, die jedoch nur

niedrige Konfidenzen besitzen (siehe **B**). Diese werden durch die hohen Konfidenzen für die wahre Klasse „Blatt“ ihrer Nachbarpunkte korrigiert (siehe **C**).



Abbildung 8: Heatmap mit Konfidenzniveaus (A), initiales Klassifikationsergebnis (B) und finale Klassenlabel nach der Glättung (C)

Falsche Klassenzuweisungen sind jedoch auch noch nach der Glättung vorhanden. Diese treten insb. an Regionen einer wahren Klasse *a* auf, deren Merkmale Klasse *b* jedoch sehr ähnlich sehen. Sind hier initial bereits hohe Konfidenzwerte für die falsche Klasse *b* vorhanden, wirken diese Regionen während der Glättung u. U. mächtiger auf benachbarte Punkte der wahren Klasse *a* mit niedriger Konfidenz ein. Dieses Verhalten ist in **Abbildung 8** am kleinen Blatt im oberen rechten Bereich zu beobachten, welches sowohl farblich als auch geometrisch der Klasse „Stamm“ sehr ähnelt. Die dominierenden initial hohen Konfidenzwerte für die falsche Klasse „Stamm“ verhindern eine Korrektur der nur wenigen Punkte der wahren Klasse „Blatt“. Lediglich ein kleiner rechter Bereich besitzt eine entsprechend hohe Menge korrekt klassifizierter Punkte mit initial hoher Konfidenz. Denkbar wäre an dieser Stelle ein weiterer Klassifikationsschritt unter der Nutzung von Vorwissen, wie bspw. der Bedingung einer ununterbrochenen Konnektivität der Äste und des Stamms der Tomate, welche Stammesregionen an Blattspitzen ausschließen kann.

4 Fazit

Es wurde eine Pipeline zur Klassifikation von farbigen Punktwolken aus einem MVS Verfahren im Kontext der Phänotypisierung von Pflanzen vorgestellt. Die Nutzung von Merkmalen aus Oberflächengeometrie und Farbe durch CSHOT erlaubt die Generierung distinktiverer Klassifikationsmodelle mit IVM als mit lediglich geometriebasierten Deskriptoren. Eine Steigerung der Klassifikationsgenauigkeit kann durch Verwendung eines graphischen Modells zur Energieminimierung der Konfidenzwerte aus den IVMs erreicht werden. Der hier vorgestellte Ansatz eignet sich insbesondere für High-Throughput-Phänotypisierung unter erschwerten Bedingungen, die zugunsten hoher Geschwindigkeit MVS Methoden dem hochgenauen, aber zeitaufwändigem und farblosen Nahbereichsscanning vorziehen.

Danksagungen

Diese Arbeit wurde innerhalb des Projektes NoViSys (FKZ: 031A349) in der Projektinitiative IPAS durch das BmBF gefördert.

Literaturverzeichnis

- BEHLEY J., STEINHAGE V., CREMERS A.B. (2012):** Performance of Histogram Descriptors for the Classification of 3D Laser Range Data in Urban Environments, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 4391–4398
- BRAUN A.C., WEIDNER U. HINZ S. (2011):** Support vector machines, import vector machines and relevance vector machines for hyperspectral classification — a comparison, Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing, 1-4
- DELONG A., OSOKIN A., ISACK H.N., BOYKOV Y. (2010):** Fast Approximative energy minimization with label costs, CVPR, 333
- DORNBUSCH T., LORRAIN S., KUZNETSOV D., FORTIER A., LIECHTI R., XENARIOS I., FANKHAUSER C. (2012):** Measuring the diurnal pattern of leaf hyponasty and growth in Arabidopsis a novel phenotyping approach using laser scanning. *Funct. Plant Biol.* 39, 860–869
- FURBANK R.T., TESTER M. (2011):** Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck, *Trends in plant science*, Vol. 16, Issue 12, 635-44
- HARTLEY R.I., ZISSERMAN A. (2004):** *A. Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK
- KICHERER A., HERZOG K., PFLANZ M., WIELAND M., RÜGER P., KECKE S., KUHLMANN H., TÖPFER R. (2015):** An Automated Field Phenotyping Pipeline for Application in Grapevine Research. *MDPI Sensors* 15, 4823-4836
- KIZMA W., FOIX S., ALENYÀ G. (2012):** Plant leaf analysis using Time of Flight camera under sun, shadow and room conditions. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments*, Magdeburg, Germany
- KRAFT M., REGINA S., FREITAS D., MUNACK A. (2010):** Test of a 3D time of flight camera for shape measurements of plants. In *Proceedings of the CIGR Workshop on Image Analysis in Agriculture*, Budapest, Hungary, 26–27
- OMASA K., HOSOI F., KONISHI A. (2007):** 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of experimental Botany* 58: 881-98
- PAPROKI A., SIRAUTL X., BERRY S., FURBANK R., FRIPP J. (2012):** A novel mesh processing based technique for 3D plant analysis. *BMC Plant Biology*
- PAULUS S., DUPUIS J., MAHLEIN A-K., KUHLMANN H. (2013):** Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping, *BMC Bioinformatics*, Volume 14, (1) S. 238-251
- Paulus, S., BEHMANN J., MAHLEIN A.-K., PLÜMER L. KUHLMANN H. (2014a):** Low-Cost 3D Systems: Suitable Tools for Plant Phenotyping. *MDPI Sensors*, 14, 3001-3018
- PAULUS S, SCHUMANN H, KUHLMANN H, LÉON J. (2014b):** High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants, *Biosystems Engineering*, Volume 121, 1–11
- PLATT J.C. (2000):** Probabilistic outputs for support vector machines and comparisons to regularized likelihood methods, *Advances in Large Margin Classifiers*, 10 (3): 61–74, MIT Press, Cambridge, MA

- REMONDINO F., SPERA M. G., NOCERINO E., MENNA F. NEX F. (2014):** State of the art in high density image matching. *The Photogrammetric Record*, 29: 144-166
- ROSCHER R., FÖRSTNER W., WASKE B. (2012):** I2VM: Incremental import vector machines, *Image and Vision Computing*, Vol. 30(4-5), 263-278
- ROSE J.C., PAULUS S., KUHLMANN H. (2015):** Accuracy Analysis of a Multi-View Stereo Approach for Phenotyping of Tomato Plants at the Organ Level. *MDPI Sensors* 15, 9651-9665
- RUSU R.B., MARTON Z.C., BLODOW N., BEETZ M. (2008):** Persistent Point Feature Histograms for 3D Point clouds. *Proceedings of the 10th International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Kobe, Japan, 3212-2317
- RUSU R.B., BLODOW N., BEETZ M. (2009):** Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Kobe, Japan, 3212-3217
- SANTOS T., OLIVEIRA A. (2012):** Image-based 3D digitizing for plant architecture analysis and phenotyping. In *Proceedings of the Workshop on Industry Applications (WGARI) in SIBGRAPI 2012 (XXV Conference on Graphics, Patterns and Images)*, Minas Gerais,
- SEITZ S.M., CURLESS B., DIEBEL J., SCHARSTEIN D., SZELISKI R. (2006):** A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proc. IEEE Conf. Compu. Vis. Pattern Recogn.* 1, 519–528
- TOMBARI F., SALTI S., DI STEFANO L. (2010):** Unique Signatures of Histograms for Local Surface Description", *11th European Conference on Computer Vision (ECCV)*, September 5-11, Hersonissos, Greece
- TOMBARI F., SALTI S., DI STEFANO L. (2011):** A combined texture-shape descriptor for enhanced 3D feature matching, *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, September 11-14, Brussels, Belgium
- WEINMANN M., SCHWARTZ C., RUITERS R., KLEIN R. (2011):** A Multi-Camera, Multi-Projector Super Resolution Framework for Structured Light, *Proceedings of 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT)*, 397-404, IEEE Computer Society's Conference Publishing Services

Erkennung und Quantifizierung von Symptomen der Maiskolbenfusariose auf der Innenseite längs halbierter Maiskolben mit automatischer Spektralbildanalyse

Detection and quantification of Fusarium ear rot symptoms on the inner side of sliced maize ears by automatic spectral image analysis

Martin Kraft¹, Elisabeth Oldenburg²

¹ Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

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

E-Mail: martin.kraft@thuenen.de, elisabeth.oldenburg@jki.bund.de

Zusammenfassung: In der Maiszüchtung stellt die Resistenz gegen die Kolbenfusariose ein wichtiges Zuchtziel dar. Dazu werden zuverlässige Methoden zur Bewertung und Quantifizierung von Fusariose-Symptomen auf Maiskolben benötigt.

In einem mehrjährigen Projekt wurden Maiskolben von bis zu 20 Sorten während der weiblichen Vollblüte mit Konidien von in Deutschland vorherrschenden pathogenen *Fusarium*-Arten inokuliert. Nach der Ernte wurden die Maiskolben längs halbiert und mit einem Spektralbildsystem fotografiert.

Mittels einer selbst programmierten Bildanalyse wurde zunächst die Lage des Spindelmarks in den Bildern automatisch ermittelt. Im zweiten Schritt wurden die Bildpunkte des Marks mit einem trainierten Klassifikationsverfahren verschiedenen Befallsklassen zugeordnet. Die bildanalytisch bestimmten Befallswerte wurden mit Boniturergebnissen von Experten verglichen. Nach dem derzeitigen Projektstand wurde nicht in allen Versuchsjahren eine gute Übereinstimmung zwischen der Expertenbonitur und der automatischen Spektralbildklassifikation erreicht. An der Verbesserung des Verfahrens wird daher weiter gearbeitet.

Deskriptoren: Mais, Kolbenfusariose, Spektralbildanalyse

Abstract: *In maize breeding, resistance against Fusarium ear rot is an important aim. Breeders and authorities need reliable methods to rate and to quantify fusariosis symptoms on maize ears.*

In a 6 year project, maize ears of up to 20 cultivars were inoculated with conidia of two predominant pathogenic Fusarium species at the stage of female flowering. After harvest, the ears were cut vertically into halves and photographed with a spectral imaging system.

A self-developed image analysis software was used to localize the position of the pith in the inner side of the halves. In the next step, the pith pixels were classified by a supervised classification procedure into different infestation categories. The classification results were compared to the visual rating results of an experienced expert. The present classification quality has been partly successful, but needs further improvement with respect to a consistently good correlation between the experts rating and the automatic image analysis.

Keywords: Maize, *Fusarium ear rot*, Spectral Image Analysis

1 Einleitung

Die Verhinderung von *Fusarium*-Infektionen und Mykotoxinbildung in Maiskolben ist eine wichtige Herausforderung, um europäische Qualitätsstandards für Ernteprodukte zu erfüllen. Resistenz gegen *Fusarium*-Pathogene ist deshalb ein wesentliches Ziel der modernen Maiszüchtung. Für die züchterische Selektion ist es dabei entscheidend, *Fusarium*-spezifische Krankheitssymptome auf Maiskolben zuverlässig quantifizieren zu können. Nach dem aktuellen Stand der Technik erfolgt hierzu eine visuelle Bonitur der Symptome und Schätzung des Anteils befallener Flächen an der Oberfläche der Maiskolben (EPPO 2015).

Aus Untersuchungen der Verteilung von Krankheitssymptomen und Mykotoxingehalten, die von *Fusarium graminearum* und *Fusarium culmorum* in Maiskolben gebildet werden, ist bekannt, dass die Belastung an der Kolbenspitze meist am stärksten ist und von dort in Richtung der Kolbenmitte und -basis abnimmt. Dies gilt sowohl für die sichtbaren Symptome wie auch für die Mykotoxingehalte. Eigene Untersuchungen am Julius Kühn-Institut haben ferner gezeigt, dass die Fusariose-Symptome und ganz besonders die Mykotoxingehalte in der Spindel des Kolbens stärker sind als in den Körnern.

In dem hier vorgestellten Projekt wird untersucht, ob die sichtbaren Fusariose-Symptome im Innern der Spindel von Maiskolben durch automatische Bildanalyse zuverlässig quantifiziert werden können. Ziel ist, den Maiszüchtern ein zuverlässiges Messsystem für die Quantifizierung von Symptomen der Maiskolbenfusariose zur Verfügung zu stellen.

2 Material und Methoden

In den Jahren 2010 bis 2015 wurden in Braunschweig Anbauversuche mit verschiedenen Maissorten durchgeführt. In der Zeit der weiblichen Blüte wurden die Maiskolben künstlich mit mykotoxinbildenden Arten von *F. graminearum* und *F. culmorum* inokuliert, um Fusariose-Symptome hervorzurufen. Die Kolben wurden zur späten Teigreife bis zur Vollreife von Hand geerntet, die Lieschblätter entfernt und die Kolben mit einer Bandsäge einmal längs durchgesägt.

Ein erfahrener Experte bonitierte die Maiskolben und notierte bei sichtbaren Fusariose-Symptomen den Anteil der befallenen Flächen an der Gesamtfläche der Innenseite der halbierten Spindeln (**Abbildung 1**). Bei einigen Kolben trat ein deutlich von den Fusariose-Symptomen unterscheidbarer Schwärzepilzbefall auf. Die Schwärzepilz-Symptome wurden separat bonitiert.

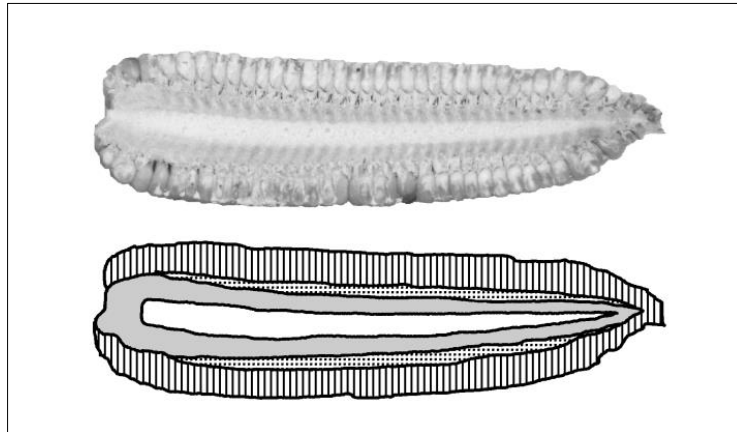


Abbildung 1: Schnittfläche eines längs halbierten Maiskolbens (oben) und Zerlegung (unten) in das zentrale Mark (weiß), den verholzten Spindelmantel (grau), den Übergangsbereich Spreu (gepunktet) und die Körner (gestreift).

Für die Bildanalyse stand ein Spektralbildsystem der Fa. Zeutec zur Verfügung, das aus einem Spektrograph Specim ImSpector V10E, einer nicht näher benannten CMOS-Kamera (Zeutex LuxVis) und einem Drehspiegel aufgebaut ist. Die Aufnahmen erfolgten in einer Beleuchtungshalbkugel, die eine diffuse weiße Beleuchtung sicherstellte. Das System bildete den Wellenlängenbereich von 460 nm bis 1.130 nm ab, wobei der Bereich von 460 nm bis 480 nm im Gesamtsystem lichtschwach und stark verrauscht war. Alle Aufnahmen wurden mit einem Spectralon-Standard (60%) spektral kalibriert, der in jedem Bild zusammen mit 2 Maiskolbenhälften aufgenommen worden war. Zur Unterdrückung des Rauschens wurden die Bilder sowohl räumlich als auch spektral mit Gauß-Filtern Tiefpass-gefiltert.

Aus den Aufnahmen jedes Versuchsjahrs wurden einzelne Beispielkolben mit deutlich sichtbaren Symptomen ausgesucht und in den Spektralbildern manuell Bildausschnitte der Symptomklassen „ohne Befall“, „Fusariumbefall“ und „schwarz“ als Trainingsflächen für die Klassifikation ausgewählt.

Für die Klassifikation wurde neben den kalibrierten Reflexionswerten der Wellenlängen 460 nm bis 1.130 nm (in 10 nm-Schritten) auch noch die zweite Ableitung der Tiefpass-gefilterten spektralen Signaturen im selben Wellenlängenraster berücksichtigt, die mithilfe des Marr-Hildreth-Operators (MARR & HILDRETH 1980, Formel 5) berechnet wurden. Insgesamt standen somit 136 Merkmale für die Klassifikation zur Verfügung.

Aus allen Trainingsdaten wurden mit einer linearen Diskriminanzanalyse diejenigen Merkmale ermittelt, die zunächst die beste Trennung der Klasse „schwarz“ von allen

anderen Klassen erlaubte. In einer zweiten Diskriminanzanalyse wurden die bestgeeigneten Merkmale für die Unterscheidung der Klassen „ohne Befall“ und „Fusariumbefall“ gesucht. Diese sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Merkmale für die zweistufige Klassifikation. Im ersten Schritt erfolgt die Entscheidung zwischen der Klasse „schwarz“ und der Gesamtheit der anderen beiden Klassen. Im zweiten Schritt erfolgt die Entscheidung, ob ein Fusariumbefall vorliegt oder nicht

Schwarz	Fusariumbefall
Reflexion 580 nm Reflexion 810 nm	Reflexion 770 nm Reflexion 860 nm 2. Ableitung 940 nm 2. Ableitung 1080 nm

Aus den Trainingsdaten der Jahre 2010 bis 2015 und den in **Tabelle 1** genannten Merkmalen wurden zwei Fisher'sche Diskriminanzfunktionen für die beiden genannten Entscheidungsschritte berechnet. Dabei wurden die Diskriminanzfunktionen für jedes Versuchsjahr getrennt aus den Trainingsdaten der jeweils anderen 5 Jahre berechnet, um eine Kreuzvalidierung zu ermöglichen.

Vor Beginn der pixelweisen Klassifikation lokalisierte die selbst geschriebene Bildanalysesoftware automatisch die beiden Maiskolbenhälften und den Graustandard. Aus den Umrissen der Maiskolben wählte die Software entlang der Kolbenlängsachse ein zentrales Band mit einer Breite aus, die 20% der Gesamtbreite der Kolbenhälfte an der jeweiligen Stelle entsprach. Dieser Anteil entspricht nach eigenen Beobachtungen etwa der Breite des Marks im Innern der Spindel.

Nur die so ausgewählten Bildpunkte des Marks wurden klassifiziert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die spektralen Signaturen der Trainingsflächen zeigten im sichtbaren Wellenlängenbereich deutliche Unterschiede zwischen den Klassen „ohne Befall“, „Fusariumbefall“ und „schwarz“ (**Abbildung 2**). Das gesunde Spindelmark hatte eine hohe Reflexion im grünen (ca. 550 nm) und roten (ca. 650 nm) Wellenlängenbereich. Die blau- (ca. 460 nm) Reflexion war niedriger, allerdings war auch das Spektralbildgerät bei den Wellenlängen bis ca. 480 nm sehr lichtschwach, so dass die dargestellten Spektren in diesem Bereich nur als grobe Annäherung interpretiert werden können. Flächen mit starkem Fusarium-Befall wiesen dagegen eine deutliche Absorption im grünen Wellenlängenbereich (ca. 500 nm bis 600 nm) und einen mehr oder weniger starken Anstieg im Übergang zum roten Wellenlängenbereich auf, der zu der häufig gut sichtbaren rosa- oder rot-Färbung der Befallsflächen führte. Bei schwächerem Fusarium-Befall war die grün-Absorption geringer und bei sehr schwachen Befallssymptomen (in **Abbildung 2** nicht dargestellt) näherte sich

die spektrale Signatur im sichtbaren Wellenlängenbereich der Signatur gesunder Flächen an, so dass eine sichere Unterscheidung nicht möglich war.

Im Infrarotbereich war in den Spektren der befallenen Flächen ein stetiger Anstieg der Reflexion bis zu einer Wellenlänge von ca. 930 nm bis 975 nm erkennbar, gefolgt von einem deutlichen Abfall der Reflexion hin zu den höheren Wellenlängen. Dieser „Knick“ in der spektralen Signatur (negative 2. Ableitung bei 940 nm, **Abbildung 3**), stellte sich in der linearen Diskriminanzanalyse als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal zwischen befallenen und gesunden Flächen heraus.

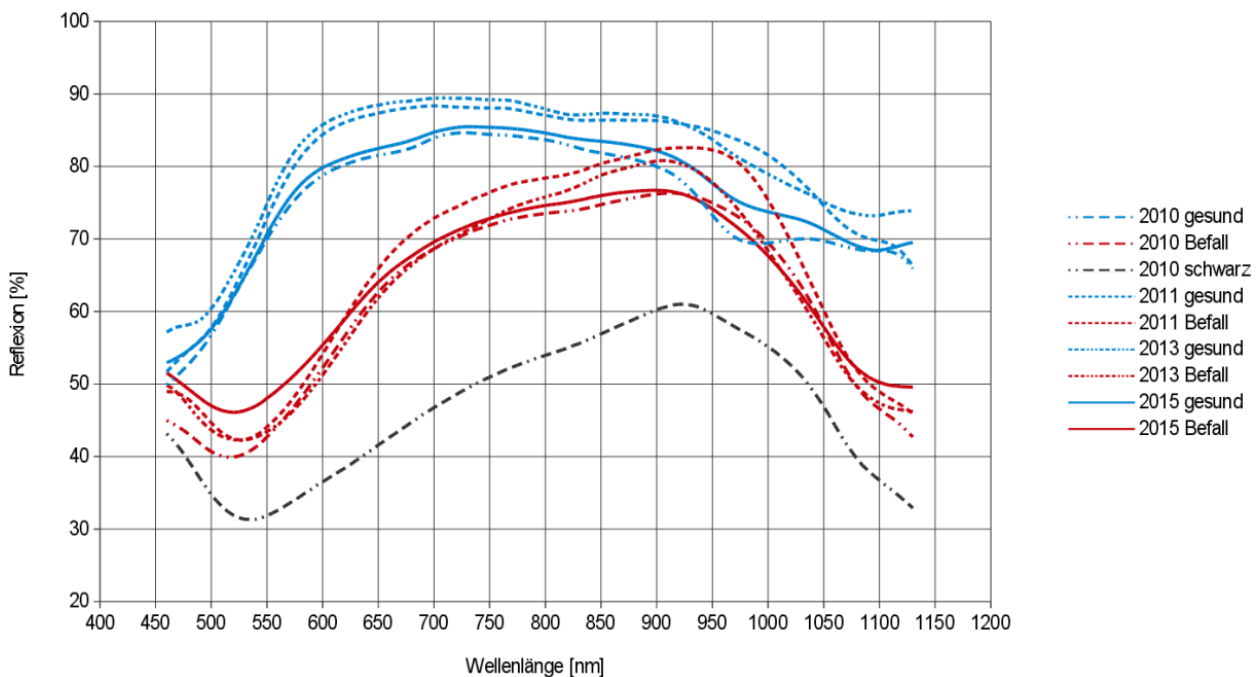


Abbildung 2: Spektrale Signatur des Spindelmarks auf der Innenfläche halbiertes Maiskolben. Dargestellt sind die Mittelwerte der Trainingsflächen aus vier Versuchsjahren. Die rot dargestellten Flächen zeigten sichtbare Fusariose-Symptome, wobei nicht untersucht wurde, welche *Fusarium*-Pathogene vorlagen und ob es sich in einzelnen Fällen um andere Krankheiten handelte. Ein deutlich sichtbarer Schwärzepilzbefall trat nur 2010 und 2012 (nicht dargestellt) auf.

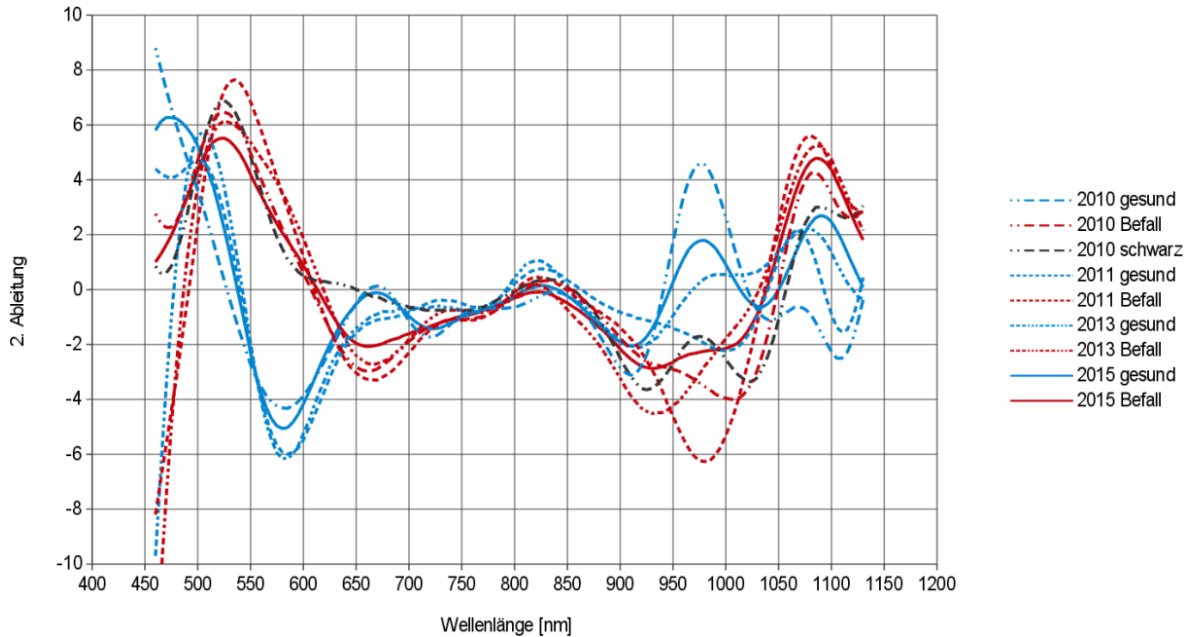


Abbildung 3: Zweite Ableitung der Spektalsignale aus **Abbildung 1**, berechnet mit dem Marr-Hildreth-Operator aus den originalen, nicht glätteten Reflexionswerten.

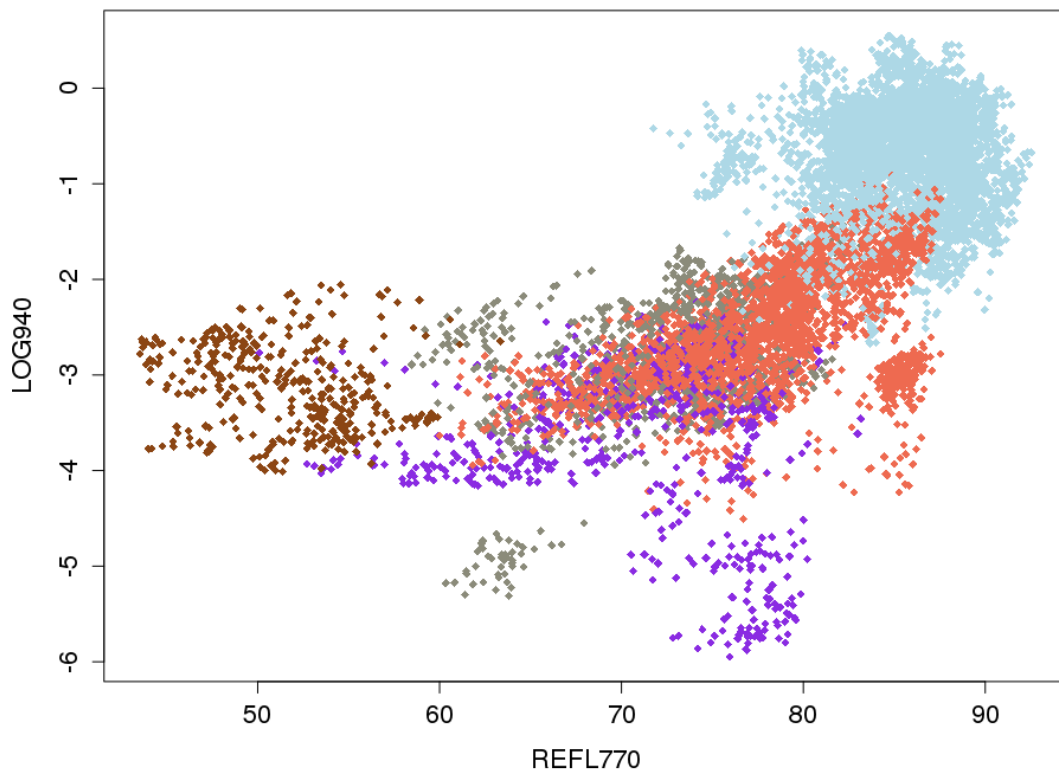


Abbildung 4: Trainingspixel aller Versuchsjahre. Dargestellt sind 5 Trainingsklassen: 1. (hellblau): gesund, 2. (rot): Fusariose-Symptome mit leicht rötlicher Färbung, 3. (violett): Fusariose-Symptome mit extrem starker Rotfärbung, 4. (grau): Befallssymptome ohne rötliche Färbung, 5. (braun): starker Schwärzepilzbefall). Die Klassen 2 bis 4 wurden in der Bonitur und in der automatischen Klassifikation zu einer Klasse (Befall) zusammengefasst. Die Merkmale REFL770 (Reflexion bei 770 nm) und LOG940 (2. Ableitung der Spektren bei 940 nm) erwiesen sich in der linearen Diskriminanzanalyse als das optimale Parameterpaar (2 Merkmale) zur Unterscheidung der beiden Klassen 1 (gesund) und 2-4 (Befall).

Tabelle 2: Übereinstimmung der Boniturergebnisse mit den automatischen Klassifikationsergebnissen. Betrachtet wurde hier nur die gesamt befallene Fläche (Summe der Flächen mit Fusariose- und Schwärzepilz-Symptomen). Der Testumfang betrug wegen des hohen Rechenaufwands nur ca. 20% des Gesamtdatenbestands. Die Stichprobe des Jahres 2013 war zu gering für eine statistische Beurteilung.

Versuchsjahr	Übereinstimmung (r^2)	Anzahl Testkolben	Durchschnittliche Befallsfläche	
			Bonitur	Bildanalyse
2010	0,82	394	12%	13%
2011	0,58	22	25%	36%
2012	0,21	68	13%	44%
2014	0,16	68	10%	25%
2015	0,63	96	9%	21%

Die Auswertung der automatischen Klassifikation war zum Zeitpunkt der Manuskripteinreichung noch nicht abgeschlossen. Für das Versuchsjahr 2010 zeigte sich eine gute Übereinstimmung ($r^2 = 0,82$) zwischen der Expertenbonitur und der automatischen Spektralbildklassifikation (**Tabelle 2**). Im Gegensatz zu der 2012 vorgestellten Auswertung des Versuchsjahrs 2010 (KRAFT & OLDENBURG 2012) konnte jetzt die gute Übereinstimmung auf der Grundlage von Trainingsdaten anderer Versuchsjahre erreicht werden.

Für die Versuchsjahre ab 2011 ergaben sich dagegen größere Abweichungen zwischen der Bonitur und der Spektralbildanalyse. Die befallene Fläche wurde von der Bildanalyse teilweise deutlich überschätzt. Beispielsweise kam es im Übergangsbereich zwischen dem Spindelmark und dem verholzten Spindelteil zu falschen Positivklassifikationen. Dieser Bereich muss noch besser durch geeignete Trainingsflächen berücksichtigt und die Bildanalyse-Software werden.

Literaturverzeichnis

EPPO (2015): PP 1/285 (1) Fusarium ear rot of maize. EPPO Bulletin 45 (3), 336-229

KRAFT M., OLDENBURG E. (2012): Detection and quantification of Fusarium-specific disease symptoms in maize ears by spectral imaging. International Conference of Agricultural Engineering, – CIGR-AgEng2012, July 8-12, 2012, Valencia, Spain

MARR D., HILDRETH E. (1980): Theory of edge detection. Proc. R. Soc. London, B 207: 187-217

Hyperspectral detection of Diaporthe /Phomopsis complex on soybean infested seeds

Detektion von Diaphorte /Phomopsis infizierten Sojabohnen mittels Hyperspektralanalyse

Gerassimos Peteinatos¹, Kim Haug², Abbas El-Hasan², Behnoush Hosseini², Ralf T. Voegelé², M. Pilar Cendrero-Mateo³, Ortrud Jäck³, Uwe Rascher³, Roland Gerhards¹

¹ Universität Hohenheim, Fg. Herbolgie, Otto + Sandler Str. 5a, 70599 Stuttgart

² Universität Hohenheim, Fg. Phytopathologie, Otto + Sandler Str. 5a, 70599 Stuttgart

³ Forschungszentrum Juelich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich

E-Mail: g.peteinatos@uni-hohenheim.de

Abstract: Members belonging to the Diaporthe/Phomopsis complex (DPC) are associated with a number of soybean diseases including seed decay, pod and stem blight and stem canker, leading to considerable deleterious effects that can result in significant yield losses both quantitatively and qualitatively. Severely infected seeds are shriveled and may not germinate and can be considered as an important source of the primary inoculum. So far, the unique used method for DPC detection is by incubating seeds on Acidified Potato Dextrose Agar (APDA) to allow pathogen's sporulation. However, this method requires considerable time for the production of pycnidia and conidia. Thus, sensors can pose as a fast, non-destructive alternative for detecting DPC on soybean seeds.

In the present study efforts have been made to identify DPC infected seeds with the aid of hyperspectral data. The principle of this method is to identify deviations on the spectrum between infected and non-infected seeds. Such analyses provide the ability to predict fungal infestation within a short time without destroying the seeds. Briefly, 750 soybean seeds of cv. Sultana (Probstdorfer Saatucht, Wien & ZG Raiffeisen), were analyzed in this experiment. Three DPC infection levels, 0%, 60% and 80%, were used (250 seeds per level).

Hyperspectral information of the seeds were gathered with a line scanner (Specim PFD V10E). This sensor can provide information from 390-1010 nm. Despite that the sensor has a resolution smaller than 1 nm, spectra were normalized on a 3 nm resolution step. Preprocessing of the data included the subtraction of the dark current and normalization with a white reference, taking into account the vignetting of the sensor. All generated spectra were averaged into a mean spectrum, per seed. All possible spectral ratios and normalized spectral indices were calculated from this spectrum and tested for their ability to detect fungal infestation.

After the measurement, seeds were surface sterilized and incubated on APDA, in a humid chamber in order to detect the actual infected seeds. Germinated seeds were classified as “infected” if they produced characteristic alpha and/or beta conidia of DPC or “non-infected” if there was no infestation. Only seeds of the two aforementioned classes were used on the analyses of the spectral data.

Although there were no visual differences among the seeds, the spectral analysis showed that the DPC infected seeds were brighter than the non-infected, with higher reflections on the red and near infrared region. These data, however not statistically significant. In contrast spectral ratios and normalized vegetation indices using spectra in the 670 – 690 nm region provided significant differences between the two previous classes. Furthermore vegetation indices like the Modified Triangular Vegetation Index 2 (MTVI2) and the Transformed Chlorophyll Absorption Ratio (TCARI) seemed to separate between infected and non-infected seeds. The current study confirmed the potential of using spectral data for detection of seeds infected with DPC.

Vergleich von traktorgestützter und UAV-gestützter Bestandestemperaturerfassung im Winterweizen

Comparison of tractor based and UAV based canopy temperature acquisition in winter wheat

Rikard Graß, Sabrina Nagler, Ulf Böttcher, Hella Ahrends, Henning Kage

*Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str.9, 24118 Kiel,
E-Mail: grass@pflanzenbau.uni-kiel.de*

Zusammenfassung: In einem Feldversuch mit 220 Winterweizen-Genotypen wurden Bestandestemperaturen (T_c) auf zwei Weisen gemessen, traktorgestützt mit Infrarotthermometern und UAV-gestützt mit Wärmebildaufnahmen. Die Unterschiede zwischen den Messergebnissen ließen sich weitgehend über Unterschiede in den Witterungsbedingungen (Lufttemperatur, Nettostrahlung, Windgeschwindigkeit) zwischen den Zeitpunkten beider Messungen erklären ($r^2 = 0,76$). Beide Verfahren sind prinzipiell zur Phänotypisierung im Rahmen von Zuchtprogrammen auf Trockenstresstoleranz geeignet. Während die im Wärmebild ermittelten T_c für Parzellen direkt miteinander vergleichbar sind, ist es traktorgestützt möglich, die für eine Auswertung der Messergebnisse und für die Selektion notwendigen Umgebungsbedingungen direkt mitzubestimmen.

Deskriptoren: Phänotypisierung, Trockenstress, Pflanzenzüchtung, Bestandestemperatur, bodengestützt, luftgestützt, UAV

Abstract: *In a field trial containing 220 winter wheat genotypes canopy temperature (T_c) was measured by two methods: tractor based using infrared thermometry and UAV based using thermal imagery. The difference in measuring results could be mainly attributed to differences in weather conditions (air temperature, net radiation, wind speed) between the time of both measurements ($r^2 = 0.76$). Both methods are suited for phenotyping purposes in breeding programs aimed at drought tolerance. While the T_c values identified for plots from thermal imagery can be compared directly, tractor based measurements allow for simultaneous recording of the environmental conditions necessary for analysis of measurements and for selection.*

Keywords: *High throughput phenotyping, drought stress, plant breeding, canopy temperature, ground based, aerial based, UAV*

1 Einleitung

Bestandestemperatur (T_c) ist ein guter Indikator zur Erfassung von Trockenstress in Pflanzenbeständen und kann somit ein interessantes Phänotypisierungsmerkmal für die Züchtung auf Trockentoleranz sein. T_c -Unterschiede können durch genotypische Unterschiede wie Durchwurzelungstiefe oder Stomatareaktion (NEUKAM *et al.* 2015) aber auch durch Bodeneigenschaften hervorgerufen werden.

Für große Parzellenversuche kann T_c punktuell in jeder Parzelle mit Infrarotthermometern oder flächenhaft mit bildgebenden Wärmebildkameras erhoben werden. Zur quantitativen Auswertung von T_c werden mikrometeorologische Einflussgrößen benötigt, die eine Berechnung der Energiebilanz an der Bestandesoberfläche erlauben (JACKSON *et al.* 1981). Diese Einflussgrößen können bei traktorgestützter Messung in jeder Parzelle simultan zu T_c gemessen werden. Eine gleichzeitige Erfassung vieler Parzellen ist so jedoch nicht möglich, was die Vergleichbarkeit zwischen Parzellen und somit die Identifikation genotypischer Unterschiede erschwert.

Die gleichzeitige Erfassung vieler Parzellen unter gleichen Umgebungsbedingungen ist bildgebend aus der Luft mit UAV möglich. Dabei ist jedoch neben den Herausforderungen einer Georeferenzierung der Wärmebilder die Erfassung der aktuellen lokalen mikrometeorologischen Umgebungsbedingungen in den jeweiligen Parzellen nur mit großem technischem Aufwand möglich.

Ziel der Arbeit ist es deshalb, die Ergebnisse von traktorgestützten Messungen mit Infrarotthermometern und UAV-gestützten Wärmebildaufnahmen für die Erhebung von T_c in Versuchspartzellen zu vergleichen.

2 Material und Methoden

In einem Winterweizenversuch mit 220 Genotypen wurden während der Vegetationsperiode 2015 ab Schossbeginn T_c parzellenspezifisch unter möglichst stabilen sonnigen Witterungsbedingungen erfasst. Die Parzellengröße betrug 1,25 m x 6 m, der gesamte Versuch umfasste 2052 Parzellen. Traktorgestützt wurde T_c mit Infrarotthermometern (IRTS-P, Apogee Instruments, Logan, Utah, USA) und zusätzlich Windgeschwindigkeit, Nettostrahlung, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Die Datenerhebung für alle Parzellen im gesamten Versuch erforderte ca. vier Stunden, was etwa acht Sekunden je Parzelle entspricht. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte sekundlich, so dass in jeder Parzelle eine Fläche von etwa 8 x 0,022 m² erfasst wurde. Die Position des Traktors wurde ebenfalls sekundlich mit einem RTK-GPS aufgezeichnet, so dass die einzelnen Messungen den Parzellen, über denen sie erfolgten, zugeordnet werden konnten. Messungen im Randbereich der Parzellen bis 0,3 m wurden verworfen, die übrigen Messungen wurden für jede Parzelle zu einem Parzellen-Mittelwert zusammengefasst.

Einmal während dieses Zeitraumes wurden mit einem Oktokopter (MK Okto XL, HiSystems GmbH, Moormerland, Deutschland) und Wärmebildkamera (FLIR T335, Flir Systems, Wilsonville, Oregon, USA) UAV-gestützt Wärmebildaufnahmen des gesamten Versuches gemacht. Die einzelnen Wärmebildaufnahmen wurden anhand des Parzellenplans in QGIS 2.0.1 (QGIS Development Team) georeferenziert (GDAL-Georeferenzierung 3.1.9, Thin-Plate-Spline-Transformation, nearest neighbour). Ein Randbereich von 0,4 m wurde innerhalb jeder Parzelle als Puffer verworfen, die Werte im etwa 2,3 m² großen Kernbereich der Parzelle (entspricht etwa 40 Bildpixel) wurden zu einem Parzellenmittelwert zusammengefasst.

Die Messungen beider Verfahren wurden gegenüber gestellt. Anschließend wurde statistisch untersucht, inwieweit die Änderung der mikrometeorologischen Umgebungsbedingungen zwischen dem Zeitpunkt der traktorgestützten Messung und dem Zeitpunkt der UAV-gestützten Wärmebildaufnahme die Unterschiede der mit beiden Verfahren ermittelten T_c erklären können.

3 Ergebnisse

Die ausgewerteten Messungen umfassten zwei Blöcke des gesamten Versuches mit je 220 Parzellen, wovon insgesamt 8 Parzellen nicht auf den UAV-gestützten Wärmebildaufnahmen abgebildet waren (**Abbildung 1**).

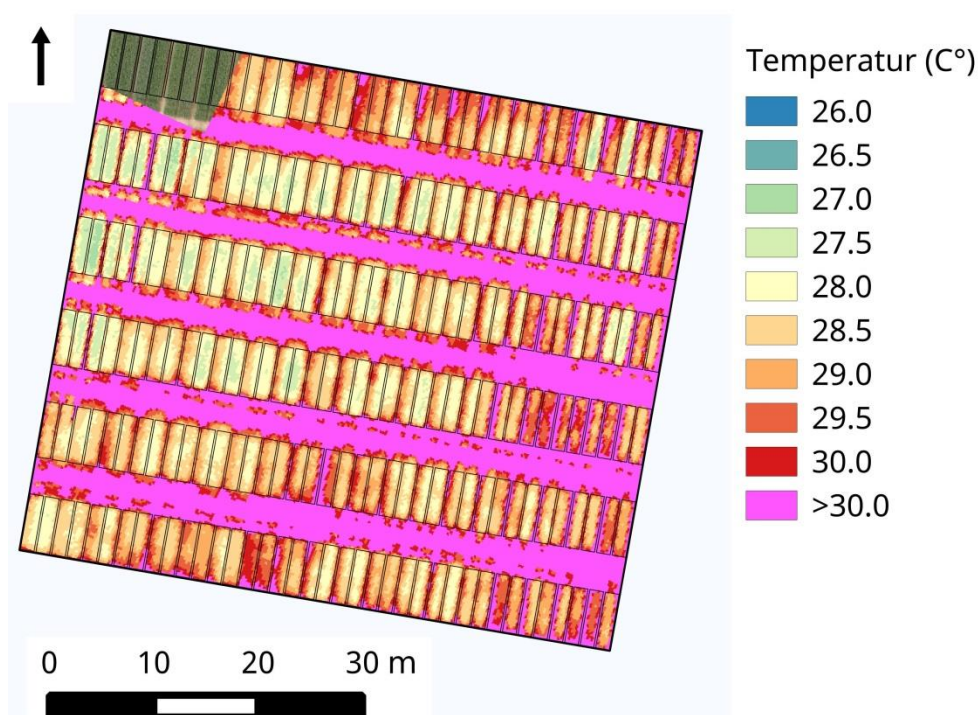


Abbildung 1: UAV-gestütztes Wärmebild eines der beiden ausgewerteten Blöcke

Die traktorgestützten Messungen von T_c in den betrachteten Parzellen erfolgten zwischen 11:20 Uhr und 14:30 Uhr und ergaben Werte zwischen $26,1^\circ\text{C}$ und $31,6^\circ\text{C}$. Die Lufttemperatur stieg in diesem Zeitraum von etwa $26,5^\circ\text{C}$ auf knapp über 29°C an. Die UAV-gestützten T_c -Messungen basierten auf vier Wärmebildaufnahmen, die zwischen 15:00 Uhr und 15:18 Uhr aufgenommen wurden. Sie ergaben Werte für die einzelnen Parzellen zwischen $26,9^\circ\text{C}$ und $31,0^\circ\text{C}$ bei einer Lufttemperatur von $28,2^\circ\text{C}$.

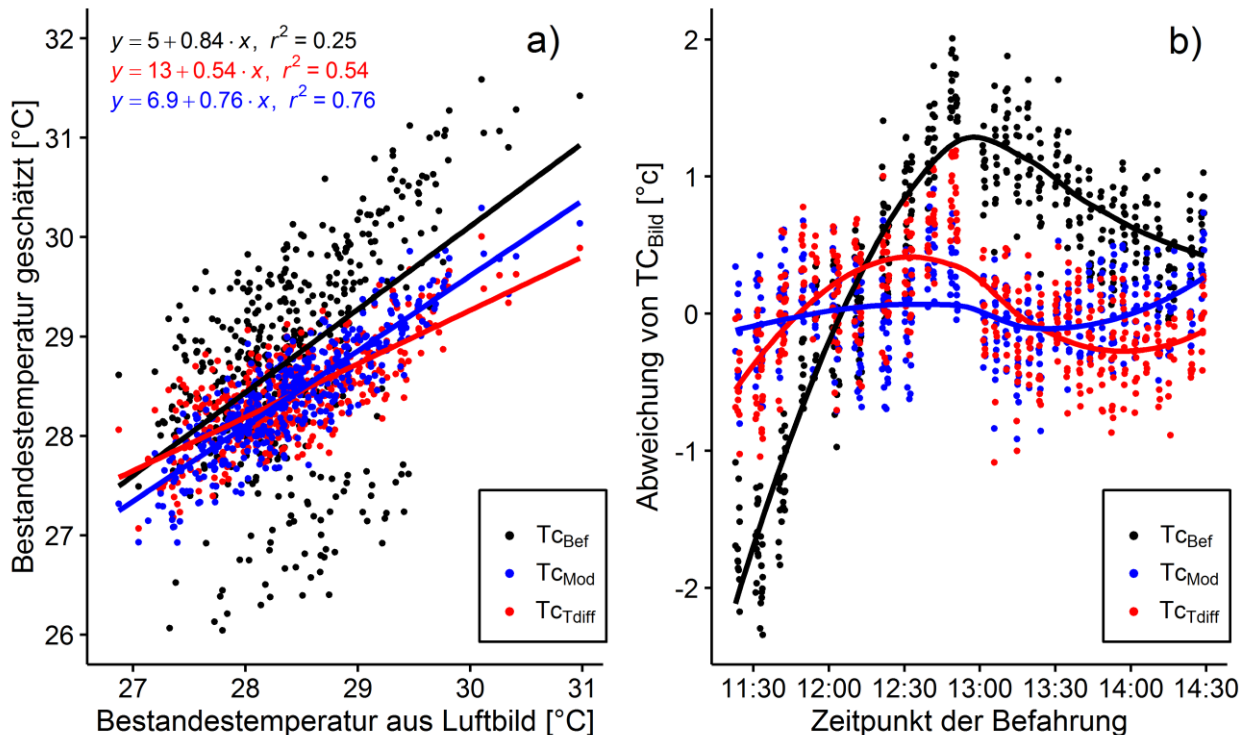


Abbildung 2: Traktorgestützte Bestandestemperaturmessung (T_{cBef}) sowie traktorgestützte Messung korrigiert um die Lufttemperatur (T_{cTdiff}) und korrigiert um Lufttemperatur, Nettostrahlung und Windgeschwindigkeit (T_{cMod}) gegen T_c aus UAV-gestützten Wärmebildaufnahmen. a) Lineare Korrelation und b) Abweichungen

Eine direkte Korrelation zwischen den beiden Messverfahren ergab einen nur schwachen linearen Zusammenhang ($r^2 = 0,25$; **Abbildung 2a**). Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen beiden Messverfahren einen klaren zeitlichen Trend je nach Messzeitpunkt der traktorgestützten Messung aufweisen (**Abbildung 2b**). Die Korrektur der traktorgestützten Messungen um die zwischen den Messungen in den einzelnen Parzellen und dem Zeitpunkt der Wärmebildaufnahme geänderte Lufttemperatur (T_{cTdiff}), ergab einen deutlich engeren Zusammenhang ($r^2 = 0,54$). Eine weitere Verbesserung des Zusammenhanges ließ sich durch eine Berücksichtigung von Nettostrahlungs- und Windgeschwindigkeitsänderungen zusätzlich zur Lufttemperaturänderung erzielen ($r^2 = 0,76$). Der Einfluss von Lufttemperatur, Nettostrahlung und Windgeschwindigkeit auf den Unterschied zwischen traktorgestützter und UAV-gestützter Messung von T_c wurde in der Statistiksoftware R 3.2.3 (The R Foundation for Statistical

Computing 2015) als lineares Modell getestet. Die Wechselwirkungen von Lufttemperatur und Nettostrahlung sowie von Nettostrahlung und Windgeschwindigkeit hatten keinen signifikanten Einfluss, so dass die traktorgestützten Tc-Messungen ($T_{c_{Bef}}$) mit folgendem Modell korrigiert wurden:

$$T_{c_{Mod}} = 2,11 + 0,94 T_{c_{Bef}} - 0,85 Ta - 0,0061 Rn + 0,29 u - 0,92 Ta \cdot u + 0,0079 Ta \cdot Rn \cdot u$$

4 Diskussion und Ausblick

Während das traktorgestützte Verfahren eine Erfassung der Witterungsbedingungen am Ort der Messung erlaubt, ermöglicht das UAV-gestützte Verfahren eine gleichzeitige Messung aller Parzellen unter gleichen Bedingungen (Li *et al.* 2014). Eine Kombination beider Verfahren erscheint vielversprechend, um die Dynamik von Tc während einer traktorgestützten Messfahrt in der Auswertung zu berücksichtigen.

Witterungsbedingungen haben wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf von Tc. Eine Korrektur der traktorgestützten Tc-Messungen um die Witterungsbedingungen macht, wie bei den UAV-gestützten Messungen, die Messergebnisse für verschiedene Parzellen vergleichbarer. Das erlaubt eine statistische Auswertung zur Detektion von genotyp- oder bodenbedingten Tc-Unterschieden. Eine quantitative Auswertung der Messergebnisse kann allerdings nur über die Energiebilanz an der Bestandesoberfläche (JACKSON *et al.* 1981, GAGO *et al.* 2015) stattfinden, welche die aktuellen Witterungsbedingungen zum Messzeitpunkt benötigt.

Die berechneten Korrekturen um die Witterungsbedingungen erfolgen in der erwarteten Richtung. War die Lufttemperatur zum Zeitpunkt der traktorgestützten Messung höher als zum Zeitpunkt der Wärmebildaufnahme, wird die traktorgestützt gemessene Tc nach unten korrigiert. Gleiches gilt für den Einfluss der Nettostrahlung, während die Windgeschwindigkeit entgegengesetzt wirkt (vergleiche MAES & STEPPE 2012). Die Korrektur erfolgte mit einem linearen Modell, obwohl die Einflüsse der Witterung auf Tc teilweise nichtlinear sind. Für kurze Messzeiträume, in denen sich die Witterungsbedingungen nur in einem begrenzten Rahmen ändern, erscheint die näherungsweise Annahme linearer Einflüsse jedoch hinreichend genau, um die Messungen vergleichbar zu machen.

Sowohl eine UAV-gestützte Erhebung der Bestandestemperatur mittels Wärmebildaufnahmen als auch eine traktorgestützte Messung mit Infrarotthermometern mit nachfolgender Korrektur der Messdaten um die Witterungseinflüsse erlaubt Vergleiche zwischen Parzellen und erscheint somit für Zwecke der Phänotypisierung großer Populationen im Rahmen von Zuchtprogrammen geeignet. Allerdings muss das Merkmal Bestandestemperatur für die Selektion in die aktuellen Bedingungen eingeordnet werden, um eine Entscheidung treffen zu können, ob Genotypen mit niedrigerer oder solche mit höherer Bestandestemperatur bevorzugt werden sollen (REBETZKE *et al.* 2012). Dazu ist eine Messung der aktuellen Witterungsbedingungen und eine Beobachtung oder Modellierung des Bodenwasserhaushalts erforderlich. Dann können Bestandestemperaturen

einen wesentlichen Beitrag zur Selektion auf den Wasserhaushalt betreffende Sorteneigenschaften liefern.

Literaturverzeichnis

- GAGO J. *et al.* (2015):** UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, pp.9–19
- JACKSON R.D. *et al.* (1981):** Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), pp.1133–1138
- LI L., ZHANG Q., HUANG D. (2014):** A Review of Imaging Techniques for Plant Phenotyping. *Sensors*, 14(11), pp.20078–20111
- MAES W.H., STEPPE K. (2012):** Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), pp.4671–4712
- NEUKAM D., BÖTTCHER U., KAGE H. (2015):** Modelling Wheat Stomatal Resistance in Hourly Time Steps from Micrometeorological Variables and Soil Water Status. *Journal of Agronomy and Crop Science*, p.n/a–n/a
- PASK A.J.D. *et al.* (2012):** Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping. Available at: <http://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/1288> [Accessed February 12, 2016]
- REBETZKE G.J. *et al.* (2012):** Genomic regions for canopy temperature and their genetic association with stomatal conductance and grain yield in wheat. *Functional Plant Biology*, 40(1), pp.14–33

Nachweis der Wirkung von Zuschlagstoffen zur Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit in agrarisch genutzten Böden Brandenburgs und die Entwicklung der Kulturpflanzen mittels Copterbefliegungen mit NIR- und RGB-Kameras

Detecting the effect of additives to improve water storage capacity and development of cultivated plants in agricultural soils of Brandenburg via Copter aerial surveys with NIR and RGB cameras

Sandra Münzel*¹, Oswald Blumenstein*¹, Daniel Spengler*², Annegret Thieken*¹

*¹ Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24/25, 14476 Potsdam,

*² Deutsches Geo-Forschungs-Zentrum, Telegrafenberg, 14473 Potsdam

E-Mail: smuenzel@uni-potsdam.de

Zusammenfassung: Böden sind die essenzielle Grundlage einer landwirtschaftlichen Produktion. Aktuell geht man davon aus, dass die sich verändernden Klimabedingungen mit einer Zunahme von Extremwetterereignissen verbunden sein werden. Durch zunehmende Trockenperioden wird das pflanzenverfügbare Wasser zu einem limitierenden Faktor für das Pflanzenwachstum. Speziell für Standorte mit einer geringen Wasserhaltekapazität, wie z.B. die sandigen Böden Brandenburgs, stellt dieser Trend einen deutlichen Standortnachteil dar.

Ziel der Forschungsarbeit ist, eine langfristige Sicherung landwirtschaftlicher Erträge in Trockenregionen unter den sich verändernden Eigenschaften des Niederschlags zu gewährleisten. Im Rahmen der Untersuchungen werden das Wuchs- und Ertragsverhalten von Agrarpflanzen mit sowie ohne Trockenstress beobachtet und ausgewertet. Durch den Einsatz von wasserspeichernden Zuschlagstoffen, die selbst entwickelt wurden, sollen zukünftig die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Landwirtschaft vermindert werden.

Die Auswertung biometrischer Daten von verschiedenen Feldfrüchten erfolgt synchron mit einer Ermittlung ihrer spektralen Eigenschaften mittels multispektraler Fernerkundung im Bereich des sichtbaren Lichts (RGB) und des nahen Infrarot (NIR) in definierten Intervallen. Eine Effizienzbewertung unterschiedlicher Zuschlagstoffe wird anhand der Erfassung der Pflanzenvitalität mittels verschiedener Vegetationsindizes vorgenommen.

Erste Ergebnisse von Gewächshausversuchen mit Hybridroggen zeigen deutlich den positiven Effekt wasserspeichernder Zuschlagstoffe auf die Vitalität der Pflanzen. Im nächsten Schritt soll eine Untersuchung von Weizen und Mais unter Freilandbedingungen mit und ohne zusätzliche Bewässerung erfolgen.

Deskriptoren: Trockenstress, Vitalität, NIR-Kamera, Pflanzenparameter, Hexacopter

Abstract: *Soils are important for the agricultural production. Due to changing climate conditions, such as increasing drought, the plant available water is a limiting factor for plant growth.*

The aim of the research is the long-term protection of agricultural yields in sandy soils of Brandenburg amid the changing characteristics of precipitation.

During the investigations, the behavior of agricultural plant growth and yield with and without drought stress should be observed and evaluated. The use of sustainable water-storing aggregates should reduce the impact of climate change on agriculture in the future.

Evaluation of the biometric data of various crops occurs synchronously with the evaluation of its multi-spectral (visible range (RGB) and near infrared (NIR)) data in defined time intervals. The evaluation takes place by means of various indices, including the NDVI (normalized differentiated vegetation index). Initial results from greenhouse experiments with hybrid rye clearly show the positive effect of water-storing aggregates on the vitality of plants. The next step is then an investigation of wheat and maize under field conditions with and without additional watering.

Keywords: *Drought stress, vitality, NIR camera, plant parameters, Hexacopter*

1 Einleitung

Der Boden ist Standort sowie Grundlage für das Pflanzenwachstum und deshalb für uns Menschen lebensnotwendig. Der Bedarf der Erdbevölkerung an landwirtschaftlich produzierten Nahrungsmitteln nimmt dabei stetig zu.

Aufgrund dieses Intensivierungsdruckes in der Pflanzenproduktion und den anstehenden Klimaveränderungen, gekennzeichnet durch Trockenperioden und Temperaturerhöhungen (PIK-REPORT 2003), sind Anpassungen im Bereich der Bewirtschaftung von Agrarflächen unabdingbar (THÜNEN REPORT 2015).

Ein Wassermangel in der Landwirtschaft kann zu verminderten Erträgen führen. Insbesondere das pflanzenverfügbare Wasser ist als limitierender Faktor anzusehen. In vielen Regionen Nordostdeutschlands dominieren sandige Böden mit einer geringen Wasserspeicherfähigkeit (vgl. **Abbildung 1**). Eine Zusatzbewässerung (vgl. MLUV 2005) ist meist teuer, zeitaufwendig oder ineffektiv. Sie ist auch unter der Sicht einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Flächen abzulehnen.



Abbildung 1: Landwirtschaftliche Produktionsfläche in Brandenburg mit extrem sandigen Arealen auf dem Schlag (Quelle: Google Earth 2014)

Andererseits sind jedoch Ertragsverluste zu verhindern und zunehmende Ertragschwankungen zu regulieren.

Vorrangiges Ziel der Forschungstätigkeit ist es, zur Sicherung langfristig stabiler landwirtschaftlicher Erträge, unter Berücksichtigung der sich veränderten Eigenschaften des Niederschlags, beizutragen. Eine nachhaltige Handlungsweise wird dabei vorausgesetzt.

Die Basis für eine Problemlösung bildet das lokale Monitoring des Pflanzenwachstums verschiedener Kulturen auf agrarisch genutzten Flächen. Dieser Algorithmus garantiert ein rechtzeitiges Einsetzen von Gegenmaßnahmen sowie eine Bewertung deren Effektivität. Das Vorhaben zielt weiterhin auf die Analyse von Möglichkeiten und der Wirksamkeit des Einsatzes nachhaltiger Zuschlagstoffe ab (vgl. **Abbildung 2**). Mit deren Hilfe können Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die landwirtschaftliche Produktion vermindert werden. Weiterhin soll deren gezielter Einsatz zur Reduzierung von Material und Kosten führen.



Abbildung 2: Wasser- und nährstoffspeichernde Zuschlagstoffe, die in den Untersuchungen zum Einsatz kommen

Konkrete Untersuchungsziele sind somit:

1. Bestimmung der Vitalitätsunterschiede von Feldfrüchten unter verschiedenen Standortbedingungen sowie ihre artenspezifische Analyse,
2. Erfassung der Wirkung von Zuschlagstoffen auf ihre Wuchseigenschaften bei Wassermangel.

Das Forschungsprojekt soll den Transfer zwischen Wissenschaft und Praxis fördern und die Zukunftsfähigkeit der ländlichen Räume stärken.

2 Material und Methoden

Der Untersuchungsraum ist gegenwärtig die Region Brandenburg. Auf den hier anstehenden sandigen Böden ist die Wasser- und Nährstoffspeicherfähigkeit stark vermindert. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf das Monitoring von Abweichungen im Wuchs- und Ertragsverhalten der Kulturen bei extremen Veränderungen des Angebotes von pflanzenverfügbarem Wasser. Theoretische Basis bilden die Wechselwirkungen innerhalb des Systems Wasser, Boden und Pflanze (siehe auch LIPIEC *et al.* 2013).

Der Nachweis möglicher Trockenstresssymptome erfolgt sowohl mit optischen als auch pflanzenphysiologischen Methoden und wird anhand von Versuchen im Gewächshaus sowie unter Freilandbedingungen vorgenommen. Es werden verschiedene landwirtschaftliche Kulturpflanzen beobachtet.

Im Zeitraum von einer Vegetationsperiode findet eine zweiwöchentliche Dokumentation der biometrischen Aufnahme der Vegetation zur Ermittlung von Biomasse, Bedeckungsgrad sowie Vitalität statt. Stressindikatoren sind zudem die Wurzellänge sowie das Verhältnis von Trocken- zu Feuchtgewicht der Pflanzen. Mittels SPAD wird der Chlorophyllgehalt der Blätter ermittelt.

Zudem werden auch relevante Bodeneigenschaften bestimmt. Hierzu gehört einerseits die Erfassung bodenphysikalischer Parameter, wie Bodendichte, -feuchte und -temperatur sowie bodenchemischer Parameter, wie pH-Wert, Leitfähigkeit der Bodenlösung und Nährstoffgehalt. Weiterhin werden bodenbiologische Eigenschaften, wie der Glühverlust und der Gehalt an totalem Kohlenstoff und Stickstoff ermittelt.

Um effiziente, flächendeckende Erfassungsmethoden und Auswertelgorithmen mit hoher Sensitivität für das Monitoring von Trockenstress landwirtschaftlicher Kulturen zu erhalten, werden die Felduntersuchungen vor Ort durch eine Analyse von multispektralen Daten ergänzt (siehe MITIS 2009). Synchron hierzu erfolgt die Auswertung biometrischer Daten der Kulturpflanzen, die sich mit bzw. ohne Trockenstress entwickeln. Für die Auswertung der Multispektraldaten werden der sichtbare Bereich (= RGB) und das Nahe Infrarot (= NIR) in den definierten Zeitintervallen hinzugezogen. Sie bilden die Basis für eine Bewertung mittels verschiedener Vegetationsindizes (HELMHOLTZ-ZENTRUM 2015), unter anderem dem NDVI (normalisierter differenzierter Vegetationsindex).



Abbildung 3: Hexacopter „HP-Y6V2“ im Einsatz über agrarischen Versuchsflächen

Im Labor werden der Wasserfluss in den Pflanzen und damit ihre Trockenstressempfindlichkeit analysiert. Die Dokumentation der Pflanzenparameter erfolgt mit RGB-Aufnahmen. Begleitend zu den Felduntersuchungen werden Spektrometer und hyperspektrale Fernerkundungsdaten hinzugezogen. Für Wetterdaten der Untersuchungsregionen stehen Klimastationen vor Ort bzw. Messwerte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung.

Bezugnehmend auf das Untersuchungsziel 1 findet in der Vegetationsperiode 2016 die Bestimmung der Vitalitätsunterschiede von Feldfrüchten unter verschiedenen Standortbedingungen sowie eine artenspezifische Analyse im Freiland auf dem Versuchsgelände in Marquardt statt, denn hier erfolgt bereits seit mehreren Jahren die Beobachtung von zwei Weizensorten, die mit bzw. ohne zusätzliche Bewässerung (vgl. **Abbildung 4**) aufwachsen. In Doppelversuchen wird dabei das Wuchsverhalten der Winterweizensorten von März bis zur Ernte im August dokumentiert (vgl. **Abbildung 5**). Eine Fläche unterliegt dabei der natürlichen Niederschlagsdynamik, die Vergleichsfläche im Bedarfsfall einer künstlichen Bewässerung.

Dabei wird das Monitoring der vegetativen Entwicklung und der Ertragsbildung in situ durch regelmäßige Copterbefliegungen (Hexacopter „HP-Y6V2“ mit einer RGB- sowie NIR-Kamera) geleistet (vgl. **Abbildung 3**).

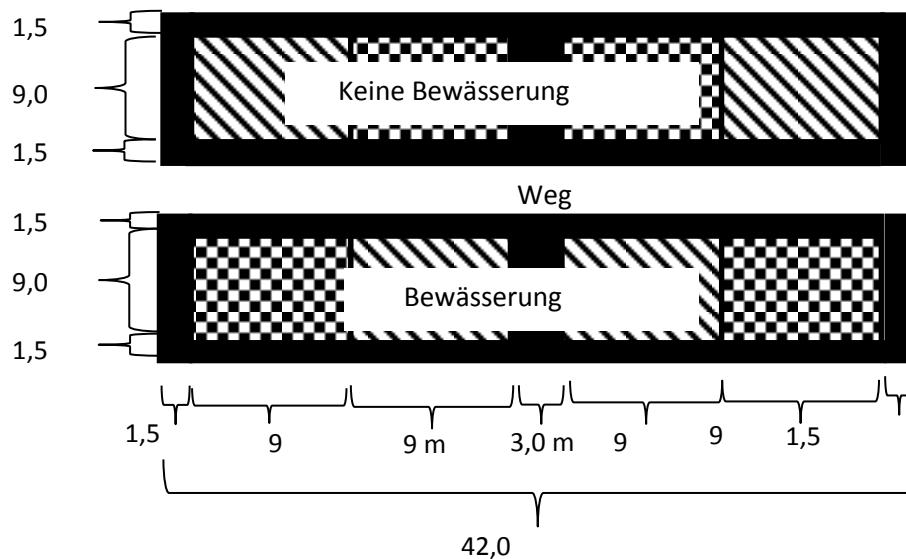


Abbildung 4: Versuchsaufbau der Felduntersuchungen in Marquardt



Abbildung 5: Verschiedene Winterweizenarten auf dem Versuchsfeld in Marquardt

Basis für die Realisierung des Untersuchungsziels 2, dem Nachweis der Wirkung von Zuschlagstoffen auf den Pflanzenwuchs bei Wassermangel, sind Gewächshausversuche mit Hybridroggen sowie Koriander (vgl. **Abbildung 6**). Dabei wurde die gleiche Anzahl Roggensamen jedem Topf zugefügt. Neben reinen Sandböden sind Töpfe zudem mit wasserspeichernden Substraten in verschiedenen Gewichtsanteilen versehen worden. Die Hälfte der Versuchsreihe wurde bewässert, die andere ab einer bestimmten Wuchshöhe unterlag einem Wassermangel und damit Trockenstress. Die wöchentlich aufgenommenen Bilder mit RGB- und NIR-Kamera erlauben die Bestimmung des NDVI und anderer Indizes.



Abbildung 6: Versuchsaufbau im Gewächshaus zur Wirkung von Zuschlagstoffen auf das Wuchsverhalten von Hybridroggen

Als Resultat dieser Topfversuche sollen optimale Mischungen von Zuschlagstoffen ermittelt und im Maisanbau auf Sandboden unter Feldbedingungen entwickelt werden.

3 Ergebnisse und Diskussion

Erste Ergebnisse der Gewächshausversuche mit Hybridroggen unter Zusatz verschiedener wasserspeichernder Zuschlagstoffe liegen vor. Die Untersuchungen zeigen deutlich den positiven Effekt dieser Zuschlagstoffe auf die Vitalität der Pflanzen. In den NDVI-Aufnahmen spiegeln sich diese Effekte wider (**Abbildung 7** und **8**).

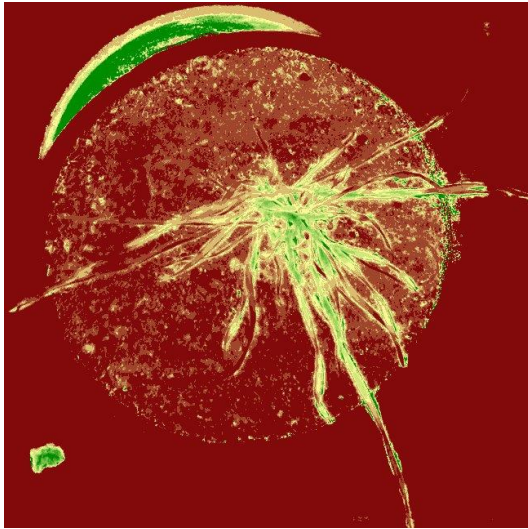


Abbildung 7: NDVI von Roggen ohne Zuschlagstoffe nach 1 Monat Trockenstress

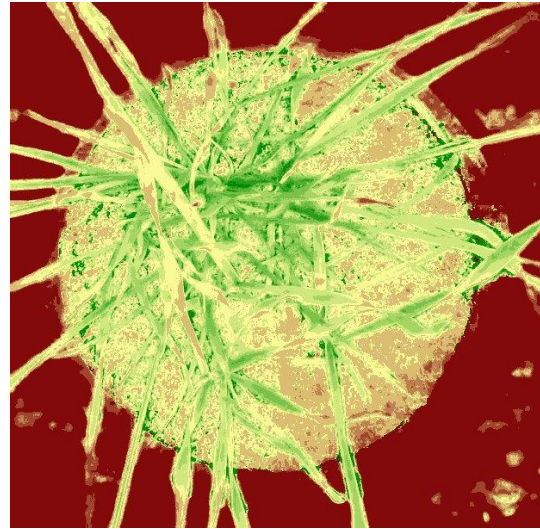


Abbildung 8: NDVI von Roggen mit Zuschlagstoffen nach 1 Monat Trockenstress

Aktuell erfolgen Topfversuche mit Koriander unter Anwendung der gleichen Zugabemengen der Zuschlagstoffe. Es wird erwartet, dass sich eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Versuche an Roggenpflanzen abzeichnet.



Abbildung 9: RGB-Aufnahme von Topfversuchen mit Koriander

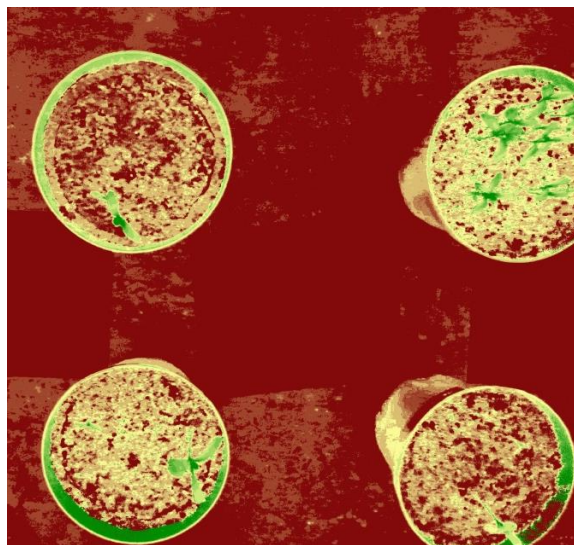


Abbildung 10: Berechnete NDVI - Aufnahme von Topfversuchen mit Koriander

Mitte März werden auf den Versuchsflächen in Marquardt weitere umfangreiche Felduntersuchungen beginnen.

Literaturverzeichnis

HELMHOLTZ-ZENTRUM GEESTHACHT ZENTRUM FÜR MATERIAL- UND KÜSTENFORSCHUNG GMBH (2015):

http://www.climate-service-center.de/033559/index_0033559.html.de
(abgerufen am 23.11.2015)

LIPIEC J., DOUSSAN, C., NOSALEWICZ A., KONDRACKA K. (2013): Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review, *International Agrophysics*. Band 27, Heft 4, Seiten 463–477, ISSN (Print) 0236-8722, DOI: 10.2478/intag-2013-0017

MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHE ENTWICKLUNG, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES BRANDENBURG (MLUV) (2005): Leitfaden zur Berechnung landwirtschaftlicher Kulturen, Frankfurt (Oder), unter http://lelf.brandenburg.de/media_fast/4055/Leitfaden%20zu%20Berechnung.pdf (abgerufen am 24.09.2015)

MITIS G. (2009): „Globale Erwärmung - Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung gegen Dürre“, Diplomarbeit

PIK-REPORT (2003): No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven

THÜNEN REPORT 30 (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015., Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut

Einfluss der Pflanzenernährung auf die Chlorophyllabbaurate bei *Solanum lycopersicum*

Effect of Plant Nutrition on Chlorophyll Degradation of Solanum lycopersicum

Namora Dietz, Chun-Fai Yu, Stefan Heimrich, Dirk Jäger, Michael Pflanz*,
Manuela Zude*

Beuth-Hochschule für Technik Berlin, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin

**Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim (ATB), Max-Eyth-Alle 100, 14469 Potsdam
E-Mail: mpflanz@atb-potsdam.de*

Zusammenfassung: Im Rahmen eines Studienprojektes wurde im Studiengang GARTENBAULICHE PHYTOTECNOLOGIE der Beuth-Hochschule für Technik Berlin eine Untersuchung zur Bestimmung des Reifegrades von klimakterischen Früchten auf der Basis zerstörungsfreier und praxistauglicher Messmethoden durchgeführt. Als Referenz wurde der reifebedingte Chlorophyllabbau im Verlauf der Fruchtentwicklung bei Tomate durch nass-chemische Pigmentanalysen ermittelt, um die zerstörungsfreien Messungen validieren.

Deskriptoren: Tomate, Chlorophyllabbau, Phytomonitoring, Nährstoffvarianten, zerstörungsfreie Sensorik

Abstract: *In terms of a study course in „horticultural phytotechnology“ at the Beuth University of Applied Sciences in Berlin an approach of phytomonitoring was tested on ripening tomato fruits under greenhouse conditions. For this purpose non-destructive optical readings were conducted directly on plants during the period of fruit development. Validation measurements were carried out in the laboratory to extract chlorophyll-a from fruit tissue.*

Keywords: *tomato, chlorophyll degradation, non-destructive spectral readings, nutrition, phytomonitoring*

1 Einleitung

Bei einem Demonstrationsversuch im Studiengang GARTENBAULICHE PHYTOTECNOLOGIE der Beuth-Hochschule für Technik Berlin wurde der Reifegrad von klimakterischen Früchten direkt an der Pflanze bestimmt. Unter verschiedenen Nährstoffstrategien wurde der reifebedingte Chlorophyllabbau während Fruchtentwicklung

auf der Basis zerstörungsfreier Messmethoden gemessen und durch chemische Pigmentanalysen validiert.

2 Material und Methoden

Im Forschungsgewächshaus der Hochschule wurden für den vorliegenden Versuch insgesamt n=48 Tomatenpflanzen (*Solanum lycopersicum* L. 'Carousel') als Jungpflanzen hydroponisch auf Steinwolle kultiviert. Um einen Einfluss auf die Reifeentwicklung und den Chlorophyllgehalt der Früchte zu induzieren, wurden neben der unbehandelten Kontrolle Magnesium und Stickstoff jeweils als Mangel- und Überschussvariante, Mangan ausschließlich als Überschuss eingestellt (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Versuchsaufbau mit Fokus auf Pflanzenernährung

Variante	ID
Stickstoffmangel	N-
Stickstoffübersorgung	N+
Magnesiummangel	Mg-
Magnesiumübersorgung	Mg+
Manganübersorgung	Mn-
Kontrolle	Ko

Anbaubegleitend wurde die Fruchtentwicklung direkt an der Pflanze aufgezeichnet (**Abbildung 1a**). Hierzu wurden zerstörungsfreie Methoden gewählt, die Spektraldaten im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereichen messen, wobei ein multispektrales (DA-Meter, Sintéleia, Italien) und ein hyperspektrales Gerät verwendet wurde (Pigment Analyzer, CP, Falkensee). Die jeweilige Lichtquelle bestand bei allen Geräten aus LEDs und die optische Geometrie war als Remissionsmessung angeordnet. Die Lichtremission wurde mittels Photodiode und Filter (DA-Meter) bzw. Spektrometereinheit mit Photodiodenarray (Pigment Analyzer) wellenlängenspezifisch erfasst.



(a)



(b)

Abbildung 1: (a) Zerstörungsfreie Messung der optischen Fruchteigenschaften mittels PigmentAnalyzer, (b) sichtbare Blattchlorosen in der Mg-Mangel Variante

Neben der Erfassung der Frisch- und Trockenmasse wurde das Kaliber der Früchte anbaubegleitend bestimmt und ins Verhältnis zur ermittelten Frischmasse gesetzt. Die Chlorophyllabbaurate wurde mit Hilfe eines modifizierten Pigmentextraktionsverfahren nach FISH *et al.* (2002) bestimmt. Eine auf etwa 0,5 g abgewogene Probe des äußeren Perikarps wurde je Versuchsglied an mehreren Terminen entnommen und bei -30°C bis zur Analyse gelagert. Für die chemische Aufbereitung wurde die Probe mittels Aceton (99% Reinheit) in einen Rührbecher gegeben, unter Zugabe von 5ml Ethanol (96%) und Verwendung eines Dispergiergerätes (UltraTurrax, IKA, Staufen) in einen extraktionsfähigen Zustand überführt. Dem Aceton-Pigment-Extrakt wurden 10 ml Hexan, sowie 3ml Aqua dest. hinzugegeben. Die Pigmente akkumulierende Hexanschicht wurde mittels Pipette (500 - 5000 μl , Eppendorf, Wesseling-Berzdorf) abgenommen und am Spektrophotometer (DR 3900, HACH, Düsseldorf) vermessen. Die Berechnung der Einzelpigmente Chlorophyll a und b erfolgte auf der Basis des Transmissionsspektrums durch eine Suprasil-Küvette (10 mm) und spektraler Segmentierung mit Hilfe von iMLR (PFLANZ & ZUDE 2008).

3 Ergebnisse und Diskussion

Unabhängig von der eingestellten Nährstoffversorgung war das Verhältnis von Frischmasse und Kaliber der Tomatenfrüchte bei allen Varianten nicht signifikant verschieden innerhalb der Varianten. Einzig die Variante mit Stickstoffüberschuss (N+) und Magnesiummangel (Mg-) wies signifikante Unterschiede auf. In der Magnesiummangelvariante (Mg-, **Abbildung 1b**) wurde Chlorophyll-a im Vergleich zur Überschuss- (Mg+) und Kontrollvariante (Ko) im Messzeitraum am stärksten abgebaut (**Abbildung 2**). Die Magnesium-Überschussvariante (Mg+) zeigte dagegen am letzten Messtag signifikant erhöhte Gehalte im Vergleich zur Kontrolle und war außerdem erhöht gegenüber der Mangelvariante (Mg-), obwohl hier zu Versuchsbeginn die höchsten Gehalte an Chlorophyll a gemessen wurden.

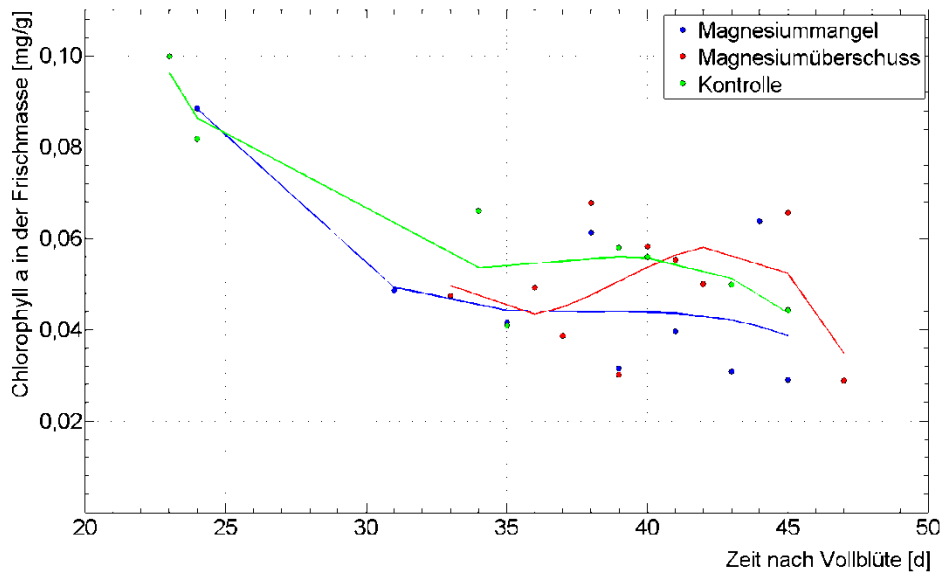


Abbildung 2: Darstellung des Abbaus von Chlorophyll a der Versuchsvarianten mit Magnesiumüberschuss und -unterversorgung im Vergleich zur Kontrollvariante.

Anbaubegleitend wurde die Entwicklung von Chlorophyllgehalten während der Frucht- reife durch zerstörungsfreie Messungen aufgezeichnet (**Abbildung 3**). Dabei zeigte sich, dass mittels Chlorophyll-sensitiven NDVIs (Normalized Differenced Vegetation Index) bis zum 31. Tag nach Vollblüte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nährstoffvarianten nachweisbar waren (**Abbildung 3a**). In der (Mg-) Variante sank der NDVI-Wert gegenüber der (Mg +) Variante und der Kontrolle dagegen ab dem 31. Tag nach Vollblüte stärker als in den Vergleichsvarianten. Diese Tendenz konnte durch Messungen mit dem DA-Meter nicht bestätigt werden (**Abbildung 3b**).

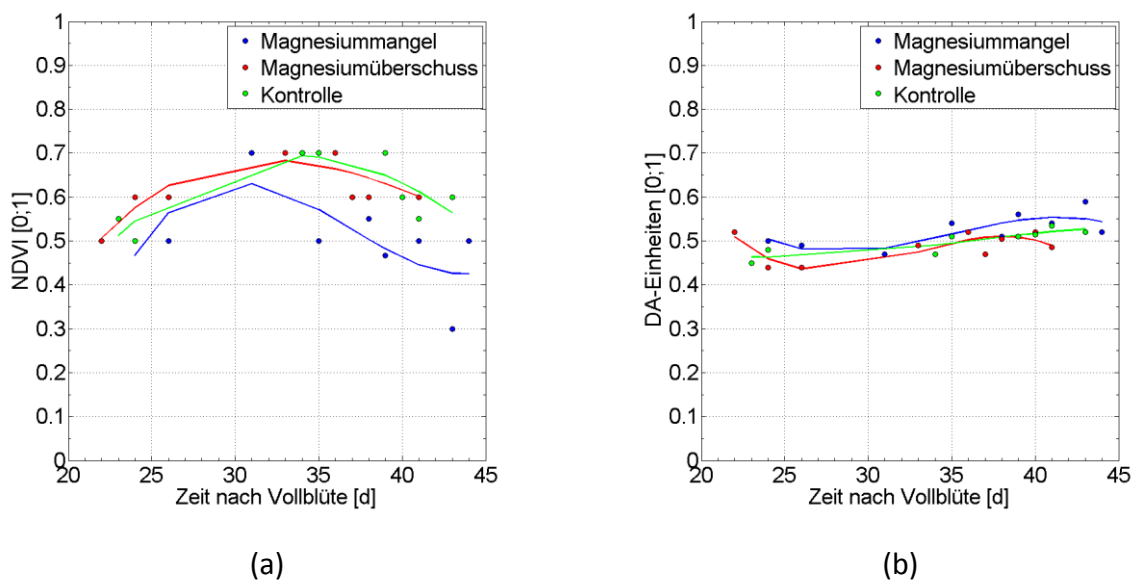


Abbildung 3: Ergebnis der zerstörungsfrei aufgezeichneten optischen Fruchtigenschaften.
(a) Verlauf des NDVI (Pigmentanalyzer) und
(b) des DA-Wertes (DA-Meter) während der Frucht reife.

Das frühe Versuchsende im Projektrahmen verhinderte eine Analyse hinsichtlich anderer Pigmente (z.B. veränderlicher Carotinoide). Um eine präzise Erntezeitpunktbestimmung zu erreichen, wäre eine anbaubegleitende Messung von β -Carotin- sowie Lutein- und Lycopingegehalten der Früchte hilfreich. Diese ist zerstörungsfrei mit einem hyperspektral arbeitenden Gerät möglich und sollte bei künftigen Versuchen durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

FISH W.W., PERKINS-VEAZIE P., COLLINS J.K. (2002): A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis* 15:309-317

PFLANZ M., ZUDE M. (2008). Spectrophotometric analyses of chlorophyll and single carotenoids during fruit development of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by means of iterative multiple linear regression analysis. *Applied Optics* 47:5961-5970

UAS-gestützte Bilanzierung von Torfabbauflächen - Ein prototypischer Ansatz zur Integration von 3D-Punkt- wolken zur halbautomatisierten Klassifikation von Torfmieten in ArcGIS

Accounting of peat bogs using UAS A prototypically approach to integrate 3D point clouds for partially automated classification of peat rents in ArcGIS

Philipp Stüwe¹, Torsten Prinz¹, Imre Sajtos²

¹ WWU Münster; Heisenbergstraße 2, 48149 Münster

² Ingenieurbüro Hofer +Pautz; Buchenallee 18, 48341 Altenberge

E-Mail: philipp.stuwe@uni-muenster.de; prinz@uni-muenster.de; sajtos@hofer-pautz.de

Zusammenfassung: Die hohe Einsatzflexibilität und die ökonomischen Vorzüge der Datenaufnahme mit Hilfe von 'unmanned aerial systems' (UAS) ermöglichen vielfältige Anwendungsoptionen, insbesondere für das Monitoring ökologischer als auch betriebsrelevanter Faktoren für Areale kommerzieller Torfgewinnung. Mittlerweile ist neben dem Einsatz klassischer optischer Sensoren auch die Berücksichtigung von kleindimensionierten LiDAR- (light detection and ranging) Systemen eine vielversprechende UAS-Option zur Gewinnung präziser morphologischer Oberflächendaten geworden, können somit für das Monitoring von Torfabbauflächen herangezogen werden.

Der hier vorgestellte integrative Verfahrensansatz basiert auf der Anpassung von ArcGIS-Funktionalitäten mit speziellem Fokus auf teilautomatisierten Klassifikationen von 3D-Punktwolken im *.las Datenformat zur Quantifizierung der Abbauvolumina in Form sogenannter 'Torfmieten'. Unter Nutzung des Model-Builders und verschiedener Programmiererweiterungen (Extensions) können z.B. LiDAR-typische *.las Datenformate eingelesen, gefiltert und 'ausgedünnt' werden. Diese hochfrequenzbereinigten Daten erfahren dann in ein Rasterkonvertierung, um so weiteren Analysen, u.a. mittels dem Spatial Analyst zugänglich zu sein. Erste Modifikationen im teilautomatisierten Workflow erlauben die Generierung unterschiedlicher Applikationskarten und 3D-Bilanzen, deren sukzessive Verbesserung und Validierung noch Gegenstand der laufenden Forschung sind.

Zusammenfassend zeigen obige Ansätze den effizienzsteigernden Effekt einer automatisierten GIS-spezifischen Einbindung von UAS-Daten im Hinblick auf ein ökologisches, aber auch ökonomisches Monitoring sowie die Volumina-Bilanzierung von Torfabbaugebieten.

Deskriptoren: UAS, Torfabbau, Topographic Position Index, ArcGIS, LAS-Format

Abstract: *Peat is still a valuable natural resource, which is exploited for many reasons nowadays. UAS based remote sensing is not only a promising tool for monitoring the restoration of cut-over bogs, it represents also a tool for the economical optimization of process workflows during its mining. By use of LAS-Data (point clouds) in combination with a topographic position index (TPI) and customized workflows within the ESRI ArcGIS Toolbox a new quantitative methodology was established to semi-automatically calculate the peat volume, which is traditionally accumulated in so called 'Torfmieten' of German peat bogs. This approach has the potential to significantly reduce laborious field surveys and may increasingly play a significant role not only in future peat-related economical but also ecological monitoring studies, since UAS are small sensor platforms, highly flexible, easy to handle and capable to produce many geodata formats, which can be analyzed in typical GIS applications to support the peat mining process itself at a comparatively low cost.*

Keywords: *UAS remote sensing, peat bogs, LAS data type, topographic position index, volume calculation workflow, ArcGIS toolbox*

1 Einleitung

Torf genießt auch in der heutigen Zeit einen hohen Stellenwert. So wird es einerseits als Brennstoff zur Wärmeengewinnung und zur Herstellung von Textilien genutzt. Andererseits findet das organische Sediment auch Verwendung in der Medizin, insbesondere der Kosmetik, als auch in der Landwirtschaft als Kultursubstrat (vgl. BUND.NET 2016).

Eine Quantifizierung der Volumina von so genannten Torfmieten ist, für Firmen, die Torf abbauen, daher von großer Bedeutung. Eine gute Möglichkeit das Monitoring ökologischer und betriebsrelevanter Faktoren für solche Areale kommerzieller Torfgewinnung durchzuführen bieten „unmanned aerial systems" (UAS).

Eine hohe Einsatzflexibilität und ökonomische Vorzüge in der Datenaufnahme gegenüber einer klassischen, terrestrischen Vermessung sind deutliche Pluspunkte, insbesondere für große und schwer zugängliche Flächen. Hierbei sind neben klassischen, optischen Sensoren, die fotografische Aufnahmen der Erdoberfläche erzeugen, auch kleindimensionierte LiDAR (light detection and ranging) Systeme eine vielversprechende Möglichkeit geworden morphologische Oberflächendaten präzise zu ermitteln. Bei LiDAR-Systemen wird mittels Laserstrahlen eine optische Distanzmessung durchgeführt (vgl. FE-LEXIKON.INFO 2016). Die aufgenommenen Daten der Erdoberfläche dieses leichtgewichtigen Laserscanners werden in Form einer 3D-Punktwolke gespeichert (LAS-Format) und können so in einem Geoinformationssystem weiterverarbeitet und ausgewertet werden.

Diese Arbeit untersucht, wie sich Volumenberechnungen eines großen Torfabbaugebiets zur Massenermittlung noch vorhandenen Torfs mit Hilfe des Einsatzes von UAS und einer Auswertung der aufgenommenen Daten in einem Geoinformationssystem

durchführen lassen. Der Fokus liegt dabei auf dem Geoinformationssystem ArcGIS in der Version 10.3. Diese Untersuchung soll die Vorteile in der Datenaufnahme bzgl. Zeit und Kosten gegenüber einer terrestrischen Vermessung, vor allem aber eine Automatisierung in der Auswertung der aufgenommenen Daten in ArcGIS darlegen.

Die bisherige Integration von 3D-Punktwolken im LAS-Format in ArcGIS erforderte eine manuelle Klassifikation anhand der Werkzeugleiste „LAS-Dataset“. Damit lassen sich Punkte des LAS-Datensatzes in einer Profilansicht darstellen und über ein interaktives Feld auswählen. Diese Selektion von Punkten kann einer gewünschten Klasse, basierend auf der Spezifikation der ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) für die LAS-Dateiversion 1.4 (vgl. ASPRS.ORG 2013), zugewiesen werden

Das Ziel dieser Arbeit soll es sein, einen teilautomatisierten Ablauf in ArcGIS abzubilden, der es erlaubt, eine Klassifikation der Torfmietenbereiche der LAS-Punkte durch wenige Schritte zu erzielen. Es sollen dabei bestehende Werkzeuge der ArcToolbox genutzt werden, die in einem Modell anhand des ModelBuilders zusammengeführt werden. Insbesondere werden Werkzeuge zur Konvertierung des LAS-Datensatzes in ein Rasterdatenformat sowie der Spatial Analyst Toolbox und der 3D Analyst Toolbox zur weiteren Berechnung genutzt.

2 Material und Methoden

Probenmaterial

Die bereits erhobenen Daten wurden von der Firma Hofer & Pautz GbR Ingenieurgesellschaft aus Altenberge zur Verfügung gestellt. Das aufgenommene Torfabbaugelände liegt in der so genannten „Esterweger Dose“ zwischen Papenburg und Oldenburg in Niedersachsen. Der mittlerweile als Naturschutzgebiet ausgeschriebene „(...) größte Hochmoorkomplex in Niedersachsen“ (NABU-EMSLAND-NORD.DE 2016) umfasst eine Fläche von 4800 Hektar. Abgesehen von relativ homogenen Torfflächen mit den Erhebungen als Torfmieten und Senken als Entwässerungsgräben, gibt es innerhalb des Gebiets wenig gewachsene Vegetation. Einzig eine große Baumreihe und ein paar Sträucher sowie vereinzelte Wasserflächen sind zu finden.

Die Datengrundlage sind 3D-Punktwolken im LAS-Format mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 5 cm und georeferenzierte, hochauflösende UAS-Orthofotos als farbiges RGB-Komposit im *.tif-Datenformat. ArcGIS kann diese Datentypen direkt lesen und verarbeiten. Sämtliche Berechnungen und Verarbeitungsschritte erfolgen anhand des LAS-Datensatzes. Das Orthofoto dient zur räumlichen Orientierung und Verifikation der Berechnungen. Anders als bei LAS-Datensätzen, die durch eine Befliegung mit einem LiDAR System aufgenommen wurden, enthält der in dieser Arbeit als Probenmaterial verwendete Datensatz lediglich Lage- und Höheninformationen. Mehrere Returns für einen Punkt in der Lage oder Intensitätswerte liegen nicht vor.

Methoden

Die gewählte Methode besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten. Zum einen werden die Bereiche der Torfmieten anhand eines neigungsbasierten Ansatzes identifiziert und selektiert. Dabei werden die Punkte des LAS-Datensatzes über eine Schwellenwerteingabe in „Bodenpunkte“ und „Nicht-Bodenpunkte“ unterschieden. Da sich durch diese Methode aber nicht nur die gewünschten Torfmietenbereiche ermitteln lassen, sondern weitere Oberflächenstrukturen mit erfasst werden, wird diese Selektion darüber hinaus über das Konzept des *Topographic Position Index (TPI)* weiter gefiltert. Dieser beschreibt einen positiven oder negativen Ganzzahlwert, der durch einen Vergleich des eigenen Höhenwertes eines Punktes mit dem Höhenwert benachbarter Punkte berechnet wird. Anhand dieser Werte erfolgt eine Gruppierung in unterschiedliche Geländeformen (vgl. JENNESSENT 2006).

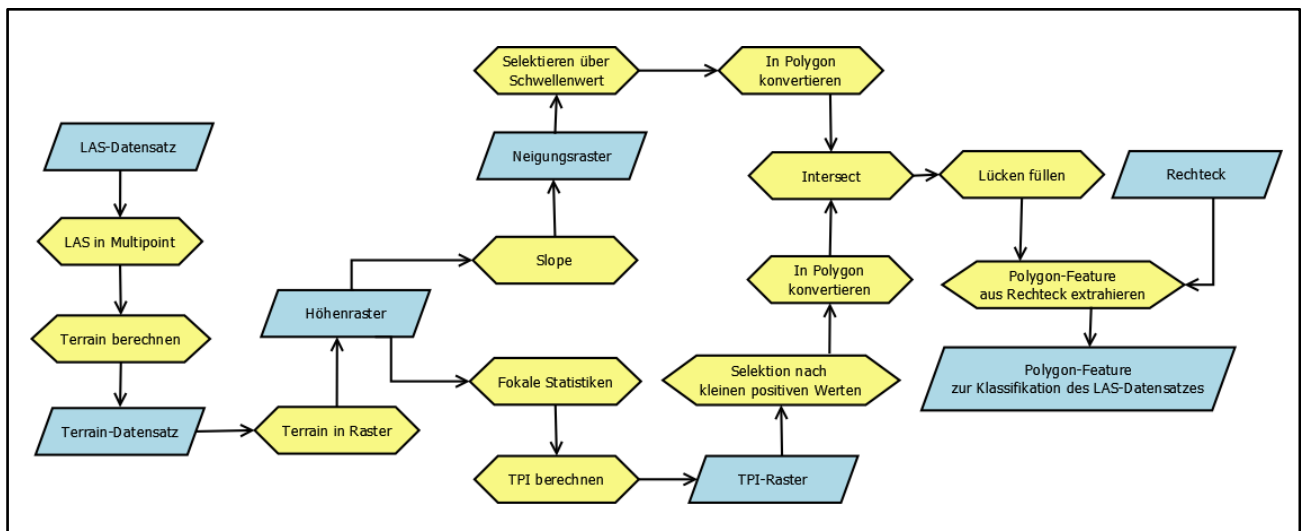


Abbildung 1: Diagramm des prototypischen Arbeitsablaufs bis zur Klassifikation der Punktwolke.

Versuchsdurchführung

Die Grundlage für die Versuchsdurchführung in ArcGIS ist eine Konvertierung der Punktwolke in ein Raster mit Höhenwerten (vgl. **Abbildung 1**). Dazu wird aus dem LAS-Datensatz ein Multipoint-Feature erstellt, das Grundlage für einen Terrain-Datensatz ist. Die Erstellung eines Terrain-Datensatzes wird über Berechnungen von Pyramiden dazu genutzt ein *Hochfrequenzrauschen* zu minimieren (DESKTOP.ARCGIS.COM 2016). Die verschiedenen Pyramidenebenen des Terrain-Datensatzes dienen nicht nur einer besseren Performance in der Anzeige, sondern bewirken auch, dass durch Reduzierung des *Rauschens* keine größeren Neigungen in eigentlich ebenen Flächen erkannt werden. Das Terrain wird in ein Raster mit Höhenwerten überführt. Dieses Raster ist die Grundlage für alle weiteren Berechnungen. So lassen sich daraus sowohl ein Neigungs raster, bei dem die Werte der Zellen der maximalen Änderungsrate bzgl. einer 3 x 3-Nachbarschaft entsprechen, sowie fokale Statistiken einer Zelle und

somit auch den *TPI* berechnen. Die Form der Nachbarschaft zur Berechnung der fokalen Statistiken ist ein Kreisring. Als äußerer Radius wird die durchschnittliche Breite einer Torfmiete in Zellen angegeben. Je nach Auflösung der LAS-Daten und des berechneten Höhenrasters variiert dieser Wert. Der innere Radius entspricht der Hälfte des äußeren Radius. Der *TPI* wird aus den fokalen Statistiken konkret über die Formel

$$TPI = \text{Int}((\text{Höhenraster} - \text{focalStat}(\text{nachbarschaft})) + 0,5)$$

berechnet.

Sowohl die Neigungswerte als auch der *TPI* werden in einem Raster gespeichert, so dass gewünschte Bereiche dieser Raster selektiert werden können. Über eine Schwellenwerteingabe werden aus dem Neigungs raster nur Zellen weiter verarbeitet, die über diesem Wert liegen. Das *TPI*-Raster wird nach kleinen positiven Werten gefiltert, welche eine kleinere Erhebung beschreiben (vgl. JENNESSENT 2006). Beide Selektionen werden in ein Polygon-Feature konvertiert. Die *TPI*-Flächen werden als Verbindungoperator eingesetzt, damit aus den Neigungsflächen nur die Neigungen an den Torfmieten ausgewählt werden.

Einige Torfmieten bilden an ihrer höchsten Stelle eine Art Plateau, so dass diese Bereiche der Miete über den neigungs basierten Ansatz nicht mit erfasst werden (vgl. **Abbildung 2**).

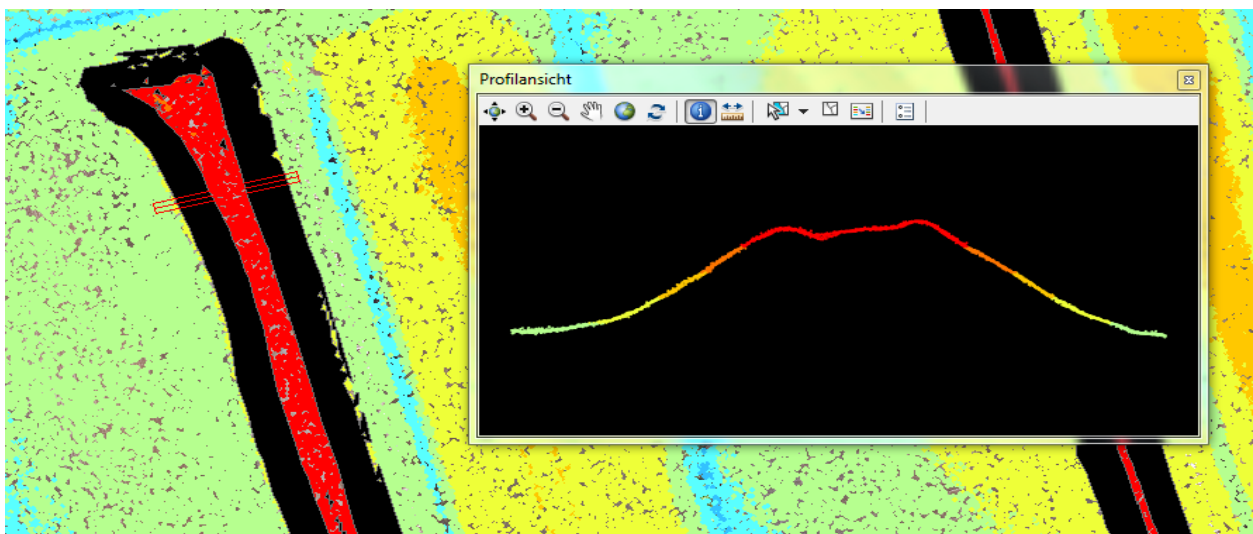


Abbildung 2: Exemplarische 2D-Profilansicht einer Torfmiete in ArcGIS zur Verdeutlichung eines Plateaus. Das erzeugte Polygon-Feature (in schwarz) erfasst nur Bereiche mit größeren Neigungswerten.

Die Profilansicht zeigt, dass die höchsten Punkte des Ausschnitts der dargestellten Torfmiete kaum Neigung aufweisen. Das in schwarz dargestellte Polygon ist das Ergebnis der Selektion des neigungs basierten Ansatzes. Es werden lediglich Flächen erfasst, die den Neigungs-Schwellenwert überschreiten. Die Torfmieten weisen jedoch zum Teil, insbesondere an ihren höchsten Stellen, ein solches Plateau auf. Diese Bereiche liegen unter dem Schwellenwert und werden bei der Selektion des Neigungsras-

ters nicht erfasst. Das Werkzeug „Union“ hilft diese Lücken zu füllen. Wird das Werkzeug eigentlich dazu gebraucht mehrere Feature-Classes oder Layer zu vereinigen, kann es an dieser Stelle dazu genutzt werden einzelne Features einer Feature-Class zu füllen. Dazu werden die erzeugten Polygon-Features als Eingabefeature gewählt. Zusätzlich wird die Option „Lücken erlauben“ deaktiviert. In der Ausgabe Feature-Class werden daraufhin für Bereiche, die vollständig innerhalb eines Polygons liegen, Features mit leeren Attributen erzeugt und so die Lücken gefüllt.

Über einen kleinen Umweg lässt sich daraus ein einheitliches Polygon-Feature erzeugen. Dafür wird zunächst ein Rechteck mit Hilfe der Werkzeugeleiste „Zeichnen“ gezeichnet und als Feature gespeichert. Dieses Rechteck sollte in etwa die gleiche Ausdehnung haben wie der LAS-Datensatz, mindestens aber so groß sein, dass es alle Polygon-Features enthält. Ein Polygon-Feature, das die Bereiche der Torfmieten abdeckt, wird letztlich aus dem Rechteck extrahiert.

ArcGIS stellt mit dem Werkzeug „LAS-Klassencodes mithilfe von Features festlegen“ der 3D Analyst Toolbox eine Möglichkeit zur Verfügung einen Eingabe LAS-Datensatz anhand von Feature-Datensätzen zu klassifizieren bzw. vorhandene Klassencodes zu ändern. Das Eingabe-Feature ist das zuvor erstellte Polygon-Feature.

3 Ergebnisse (oder Methodenentwicklung)

Die Versuchsdurchführung wurde unter Nutzung des ArcGIS ModelBuilders in einem Prozess zusammengefasst, so dass eine Automatisierung in Klassifikationsprozess der LAS-Daten bzgl. der Torfmieten erfolgt.

Eine Quantifizierung einzelner Torfmieten wird über die Berechnung von zwei Rastern mit Höheninformationen aus dem klassifizierten LAS-Datensatz erzielt. Dabei enthält das erste Raster sämtliche Punkte des LAS-Datensatzes. Das zweite Raster enthält alle Punkte, abgesehen von denen, die als Torfmiete klassifiziert sind. Über eine Auftrags- bzw. Abtragsberechnung wird in einem Ergebnisraster das Volumen und die Oberfläche für einzelne Mieten ermittelt.

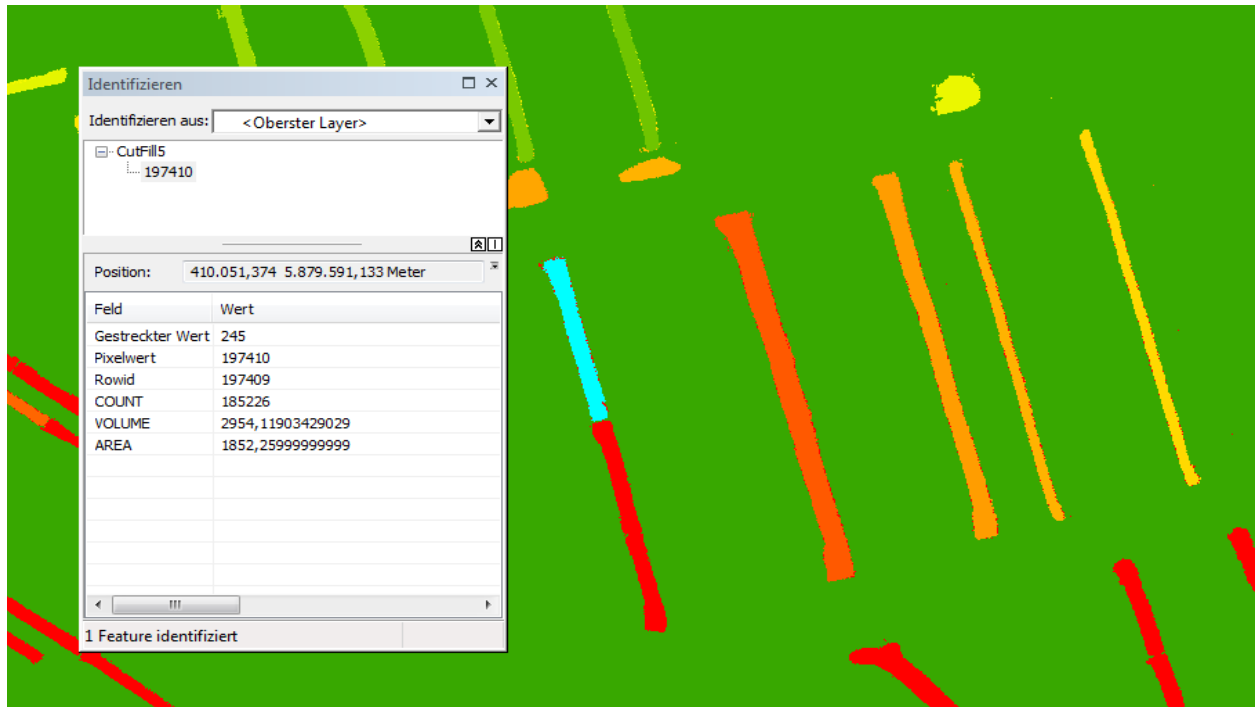


Abbildung 3: Ergebnistraster der Auftragsberechnung zur Quantifizierung der Torfmieten. Bereiche mit einer Volumenänderung werden in einer Attributtabelle des Rasters gespeichert. Bereiche, die mit dunklerem Grün gekennzeichnet sind, enthalten keine Änderung.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnistraster, in dem sich die Mieten deutlich erkennen lassen und als Objekte mit Volumen und Oberfläche zu identifizieren sind.

4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen einen prototypischen Arbeitsablauf zur Klassifikation von Torfmieten in ArcGIS auf. Für diesen konkreten Anwendungsfall lassen sich so durch UAS gewonnene Daten in ArcGIS integrieren und teilautomatisiert auswerten. Dieser prototypische Ansatz bewirkt somit eine Effizienzsteigerung gegenüber einer manuellen Auswertung dieser Daten. Eine Weiterentwicklung bzgl. einer Vorfilterung von Vegetation wäre sinnvoll. Dies wäre ein denkbarer Ansatz, wenn der LAS-Datensatz weitere Informationen (z.B. Rückgabewerte einzelner Punkte), abgesehen von Lage und Höhe, liefert.

Literaturverzeichnis

ASPRS.ORG (2013): LAS SPECIFICATION VERSION 1.4 – R13. URL:
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf
[Stand: Februar 2016]

BUND.NET (2016): Nutzung von Torf. URL:
http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/pdfs/naturschutz/20100128_naturschutz_torf_verwendung.pdf [Stand: Februar 2016]

DESKTOP.ARCGIS.COM (2016): Minimieren von Rauschen aus LIDAR für die Konturlinienabbildung und Neigungsanalyse. URL: <http://desktop.arcgis.com/de/desktop/latest/manage-data/las-dataset/lidar-solutions-minimizing-noise-from-lidar-for-contouring-and-slope-analysis.htm> [Stand: Februar 2016]

FE-LEXIKON.INFO (2016): LIDAR. URL: <http://www.fe-lexikon.info/lexikon-l.htm#lidar> [Stand: Februar 2016]

JENNESS, JEFF (2006): Topographic Position Index (TPI) v. 1.2. URL: http://www.jennessent.com/downloads/TPI_Documentation_online.pdf [Stand: Februar 2016]

NABU-EMSLAND-NORD.DE (2016): Esterweger Dose als Naturschutzgebiet ausgewiesen. URL: <http://nabu-emsland-nord.de/projekte-aktionen/esterweger-dose/> [Stand: Februar 2016]

Ein optimiertes UAV-Hyperspektralkamera-Konzept für den Einsatz in Zuchtgärten und der Landwirtschaft

An optimized concept for the application of a UAV-carried hyperspectral camera in plant breeding and agriculture

David Kiliyas, Katharina Holstein, Udo Seiffert

Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF, Sandtorstraße 22,
39106 Magdeburg,
E-Mail: david.kiliyas@iff.fraunhofer.de

Zusammenfassung: Um die zunehmend komplexeren Anforderungen und Fragen der Anwender aus der Landwirtschaft und Pflanzenzüchtung zu beantworten, werden immer sensitivere und komplexere Messverfahren zum Einsatz gebracht. Aus diesen großen Datenmengen relevante und anwendungsspezifische Informationen zu gewinnen, erfordert eine gut abgestimmte Kombination aus Sensortechnik, Sensorplattform und Auswertungsworkflow.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Konzept zum Einsatz einer leichten Full-Frame-Hyperspektralkamera an einem UAV vorgestellt. Es wird ein Überblick über die am Markt verfügbaren leichten Hyperspektralkameras gegeben, Konzept und Umsetzung einer UAV-Plattform als Sensorträger für die Cubert UHD 185 "Firefly" vorgestellt und die mathematischen Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens beschrieben.

Deskriptoren: Hyperspektral, maschinelles Lernen, Landwirtschaft, UAV

Abstract: *More sensitive and more complex sensing systems are being implemented in response to the increasingly complex demands and issues of farmers and plant breeders. A well-coordinated combination of sensor systems, sensor platforms, and analysis workflows is needed to extract information relevant for a specific application from such large quantities of data.*

This paper presents a concept for the use of a lightweight full-frame hyperspectral camera on a UAV. It provides an overview of commercially available lightweight hyperspectral cameras, presents the concept and implementation of a UAV platform as a carrier for a Cubert UHD 185 Firefly imaging spectrometer, and describes the mathematical methods from the domain of machine learning.

Keywords: *Hyperspectral, machine learning, agriculture, UAV*

1 Einleitung

Die präzise und robuste orts aufgelöste Bestimmung relevanter Eigenschaften von Kulturpflanzen im Hinblick auf deren Ernährungs- und Gesundheitszustand nimmt in der modernen Landwirtschaft, der Pflanzenzüchtung sowie der akademischen Grundlagenforschung stetig an Bedeutung zu. Um die häufig komplexen Muster des Ernährungs- und Gesundheitszustandes von Kulturpflanzen quantitativ bewerten zu können sind in der Regel, über deren morphologische Eigenschaften hinaus, detaillierte Aussagen zum Stoffwechsel erforderlich.

Um diese Aussagen nicht-invasiv und in Echtzeit zu erhalten, werden Hyperspektralkameras als Ergänzung bzw. Alternative zu etablierten Nasslabor-Analysen eingesetzt. Die Einsatzgebiete reichen vom Labor über das Gewächshaus bis hin zum Feld, und hier von Versuchs- und Ertragsparzellen der Größe einiger Quadratmeter bis zum viele Hektar umfassenden Schlag. Um die Lücke zwischen Landmaschinen-basierten Trägerplattformen und klassischem Bildflug zu schließen, bietet sich der Einsatz moderner Multicopter (UAV) an. Insbesondere bei der Integration hyperspektraler Kameras in UAVs ergeben sich besondere Herausforderungen in Bezug auf die größere Masse und den erhöhten Energiebedarf.

Im Folgenden werden die rechtlichen Grundlagen für den kommerziellen Einsatz von UAV-gestützten Sensorsystemen vorgestellt. Im Anschluss werden einige repräsentative Vertreter leichter, für den Einsatz auf UAV geeigneter hyperspektraler Kameras vorgestellt, ihre Vor- und Nachteile diskutiert und daraus die Anforderungen an ein UAV-Kamera-System für das beschriebene Einsatzszenario abgeleitet. Anschließend wird die Umsetzung des Konzepts und ein Verfahren zur Gewinnung von anwendungsrelevanten Informationen aus den erhobenen Hyperspektraldaten vorgestellt.

2 Rechtlicher Rahmen

Der Einsatz unbemannter Luftfahrtsysteme (UAV/UAS) wird in Deutschland durch das Luftverkehrsgesetz (LuftVG) geregelt. Der Einsatz von UAV zu Zwecken, die nicht dem Sport oder der Freizeitgestaltung dienen, ist erlaubnispflichtig. Zur Harmonisierung des Verwaltungshandelns wurden von Bund und Ländern einheitliche Regelungen für die Erteilung von Aufstiegs genehmigungen² herausgegeben. Für UAV mit einem Abfluggewicht von weniger als 5 kg gibt es die Möglichkeit, eine allgemeine Aufstiegs genehmigung zu erhalten. Für UAV mit einem Abfluggewicht von bis zu 25 kg werden generell nur Einzelaufstiegs genehmigungen erteilt. Zu beachten sind in diesem Zusammenhang die luftfahrtrechtlichen Beschränkungen für den Einsatz von UAV. So ist die Flughöhe auf maximal 100 m über Grund und die maximale Entfernung vom Steuerer durch die Forderung nach einer Sichtverbindung zum Fluggerät auf einen Radius von etwa 500 m beschränkt. Der autonome Einsatz von UAV, wie zum Beispiel das Abfliegen einer vor-

² <https://www.uavdach.org/aktuell/NFL-1-281-13.pdf>

her geplanten Mission anhand von Wegpunkten, ist gestattet, wenn der Steuerer zu jedem Zeitpunkt in der Lage ist, die Kontrolle zu übernehmen um etwaige Gefahren abzuwenden.

3 Übersicht UAV-taugliche Hyperspektralkameras

Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die derzeit verfügbare Technologie geben und die Vor- und Nachteile der einzelnen Sensorsysteme und Messprinzipien beleuchten. Die technischen Eckdaten der vorgestellten Sensoren sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht leichter Hyperspektralkameras

Sensor	Technologie	Spektral	#Bänder	Auflösung	Framerate	Gewicht
Cubert UHD-185³	Full Frame	450-1000 nm	125	50x50 px	<5 cubes/s	~870 g
Rikola VIS-NIR HSI⁴	Tunable Sensor	500-900 nm	~380 max	1010x1010 px	30 frames/s	~720 g
NEO Mjólnir-1024⁵	Push broom	400-1000 nm	200	1024 px	285 lines/s	3 kg

Bei der Cubert UHD 185 - Firefly handelt es sich um einen sog. *Full Frame Imager*. Bei diesem Messprinzip wird die aufzunehmende Szene mit einer Belichtung in allen Wellenlängen gleichzeitig abgebildet. Diese Eigenschaft des Messverfahrens ermöglicht es, auch bei Anbringung auf einem UAV aus der Bewegung heraus vollständige hyperspektrale Bildstapel aufzunehmen. Erkauft wird dieser Vorteil mit einer Reduzierung der räumlichen Auflösung des Sensors auf 50x50 Pixel, welche jeweils 125 Wellenlängen im Bereich von 450 bis 1000 nm abbilden. Die Aufnahmen eignen sich daher nur noch begrenzt, um beispielsweise Aussagen über den Zustand individueller Pflanzen auf dem Feld oder in einer Versuchsparzelle zu machen und bieten sich eher für flächenbezogene Fragestellungen an. Das Messsystem besteht neben der Kamera aus einem kleinen Aufnahmerechner, welcher auf dem UAV mitgeführt werden muss.

Der Rikola VIS-NIR HSI Sensor basiert auf einem *Fabry-Perot Interferometer*, welches für jede Aufnahme auf eine spezifische Wellenlänge eingestellt wird. Durch die Aufnahme einer Serie von Bildern mit unterschiedlichen Wellenlängen lässt sich so ein hyperspektraler Bildstapel erzeugen. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der mit 1000x1000 Pixel im Vergleich zur Cubert UHD 185 wesentlich höheren räumlichen Auflösung. Bedingt durch das Aufnahmeverfahren ist jedoch die Aufnahme eines vollstän-

³ <http://cubert-gmbh.de/wp-content/uploads/UHD-185.pdf>

⁴ http://www.rikola.fi/Hyperspectral_camera.pdf

⁵ <http://www.hyspex.no/products/mjólnir.php>

digen Hyperspektralwürfels mit allen 380 Wellenlängen zu zeitaufwändig, um im Flug ohne ein Anhalten an den Wegpunkten durchgeführt zu werden. Dieser Nachteil relativiert sich jedoch, falls für eine Fragestellung bereits bekannt ist, dass nur eine geringe Menge von Wellenlängen relevant ist. Eine weitere Herausforderung stellt die Rekonstruktion der Orthomosaike dar, da nicht nur einzelne Bildausschnitte einer Wellenlänge zueinander, sondern auch die Orthomosaike in den unterschiedlichen Wellenlängen zueinander orientiert werden müssen.

Das von NEO angebotene System HySpex Mjolnir-1024 ist ein *Push Broom Imager*, welcher das Spektrum einer einzelnen Bildzeile aufzeichnet und das zweidimensionale Bild durch eine translatorische Bewegung des Sensors oder des aufzunehmenden Objekts erzeugt. Im Gehäuse der Kamera ist neben dem Aufnahmerechner auch ein GPS-Empfänger und ein INS-System integriert, welche die Aufzeichnung der für die Bildrekonstruktion notwendigen Daten direkt am Sensor ermöglichen. Mit einem Gewicht von etwa 3 kg ist dies das schwerste System in dieser Übersicht. Das von NEO vorgeschlagene Trägersystem hat ein Abfluggewicht von 16 kg. Ein Einsatz wäre in Deutschland also denkbar, ist jedoch mit einem erheblich größeren organisatorischen Aufwand verbunden. Ein großer Vorteil des Messprinzips ist, dass die notwendigen Methoden zur Verarbeitung der Daten aus dem Einsatz hyperspektraler Kameras auf Flugzeugen und Satelliten etabliert sind und keiner weiteren Entwicklungsarbeit bedürfen.

4 Anforderungen an das UAV

Das hier vorgestellte Konzept behandelt ein UAV als Träger für die Cubert UHD 185 – Firefly. Die im Folgenden ausgeführten Anforderungen an das UAV ergeben sich aus den Eigenschaften der Messtechnik und den rechtlichen Rahmenbedingungen im Zusammenspiel mit den Messaufgaben.

Die primäre Anforderung ist eine Zuladung von etwa 1.5 kg, ohne das Abfluggewicht von 5 kg zu überschreiten. Dieser Wert ergibt sich aus dem Gewicht der Kamera selbst, dem Aufnahmerechner, der notwendigen Kabel und der Aufhängung. Die Aufhängung hält die Kamera, gesteuert vom Flugcomputer, in Waage, so dass der aufgenommene Bildausschnitt immer direkt nach unten orientiert und unabhängig von der Fluglage des UAV ist.

Die nächst wichtigere Anforderung ist eine möglichst lange Flugzeit, um einen wirtschaftlichen Einsatz des Fluggeräts zu ermöglichen. Dieser Aspekt wird allerdings dadurch etwas abgeschwächt, dass ein Wechsel der Batterien im Einsatz sehr schnell durchführbar ist.

Auf der operationellen Ebene ist es zudem günstig, wenn das UAV für den Transport möglichst kompakt verpackbar ist und trotzdem ohne zu lange Rüstzeiten einsatzbereit gemacht werden kann.



Abbildung 1: Das entwickelte UAV-System mit Cubert UHD 185 im Feldeinsatz (links) und im Flug (rechts)

Eine weitere technische Anforderung ist eine redundante Auslegung aller kritischen Komponenten, um die Beherrschbarkeit des Systems im Falle technischer Probleme zu gewährleisten.

Die letzten Anforderungen betreffen im Wesentlichen den Funktionsumfang des Flugcomputers. Zum einen ist die Möglichkeit wegpunktgesteuert einen Flugplan abzufliegen und zu definierten Zeitpunkten Aufnahmen auszulösen zwingend notwendig, um mit der notwendigen Präzision und Konstanz größere Flächen aufzunehmen. Zusätzlich sollte der Flugcomputer in der Lage sein, die Ansteuerung der Kameraaufhängung zu übernehmen, um eine konstante Ausrichtung der Kamera auch im Vorwärtsflug zu gewährleisten. Zusätzlich soll zur Überwachung des Zustands von UAV und Messtechnik eine Möglichkeit vorhanden sein, um während des Fluges Telemetriedaten abzurufen.

5 Technische Umsetzung

Bei der Wahl der Topologie des UAV fiel die Entscheidung auf einen Hexacopter, da für diese Konfiguration am Markt hinreichend stabile klappbare Rahmen verfügbar sind. Unterstützt der Flugrechner eine Kompensation des Ausfalls eines Motors und reicht die verfügbare Gesamtleistung aus, um auch mit fünf Motoren den notwendigen Schub zu erzeugen, bietet diese Konfiguration zudem eine Versicherung gegen leichte technische Probleme im Antriebssystem. Zusätzlich ist das System vorbereitet, um mit einer redundanten Stromversorgung ausgestattet zu werden.

Für die Kameraaufhängung fiel die Wahl auf ein Servogimbal, welches gegenüber der Alternativoption, einer durch bürstenlose Motoren angetriebenen Aufhängung, vor allem einen Gewichtsvorteil bietet. Außerdem kommt der wesentliche Vorteil der bürstenlosen Variante, nämlich ein deutlich präziseres und weiches Ausgleichen von Störbewegungen, bei der verwendeten Aufnahmetechnik mit vergleichsweise kurzen Belichtungszeiten und ohne Videosequenzen nicht zum Tragen.

Bei der Recherche der am Markt verfügbaren Flugsteuerungen wurde festgestellt, dass bei vielen Modellen die im letzten Abschnitt beschriebenen Anforderungen nur durch umfangreiche Addons und zusätzliche Softwarekomponenten verfügbar sind. Die Wahl fiel dann auf die Pixhawk⁶ des Herstellers 3D Robotics, welcher alle benötigten Funktionen bereitstellt. Durch das verfolgte Open-Source-Konzept gibt es zum einen mehr als eine Firmware für die eigentliche Flugsteuerung und zum anderen eine vielfältige weltweite Nutzergemeinde. Zusätzlich wird die Software stetig verbessert und um neue Funktionalität erweitert. Auch bei der Software, welche auf der Bodenstation eingesetzt wird, um die Flugplanung vorzunehmen und den Flugeinsatz zu überwachen, gibt es mehr als eine Option.

Tabelle 2: Wesentliche Kenngrößen des entwickelten UAV

Anzahl Antriebe	6
Luftschraubendurchmesser	15 "
Batteriespannung	22 V
Akkukapazität	7 Ah – 14 Ah
Abfluggewicht mit Cubert UHD 185	5 kg
Max. Abfluggewicht	7 kg

6 Methoden zur Auswertung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die technische Umsetzung der Integration einer geeigneten Hyperspektralkamera in einen spezifisch für diesen Einsatzfall entwickelten UAV beschrieben worden ist, widmet sich dieses Kapitel der Datenverarbeitung, insbesondere der Ableitung relevanter Eigenschaften des Ernährungs- und Gesundheitszustandes der aufgenommenen Pflanzen aus den hyperspektralen Rohdaten.

Zunächst findet eine Vorverarbeitung bestehend aus den Schritten Orthorektifizierung (Entfernung der Verzerrungen der aufgenommenen Bilder und Zusammenfügung zu einem Gesamtbild der aufgenommenen Fläche), Weißabgleich (Korrektur von Sensitivitätsschwankungen des Sensors) und Radianzkalibration statt.

Nach diesen Vorverarbeitungsschritten wird ein dediziertes mathematisches Kalibrationsmodell erstellt (Kalibrationsphase) bzw. angewendet (Arbeitsphase). Das Vorgehen ist in **Abbildung 2** dargestellt.

⁶ <https://store.3dr.com/products/3dr-pixhawk>

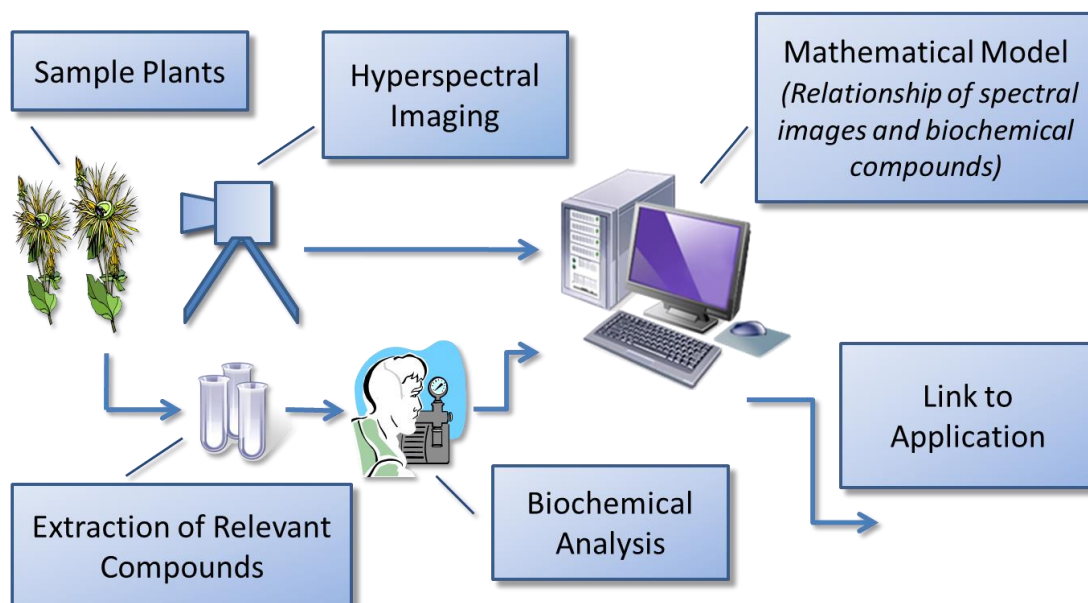


Abbildung 2: Systemmodell zur Ableitung relevanter Eigenschaften des Ernährungs- und Gesundheitszustandes der aufgenommenen Pflanzen aus den hyperspektralen Rohdaten. Der untere Zweig ist nur zur Erstellung und Validierung des mathematischen Modells erforderlich und wird im Produktivbetrieb nicht verwendet.

Da in der Regel ein analytischer Zusammenhang zwischen spektraler Signatur und pflanzenrelevanten Zieldaten nicht verfügbar ist, sind rein datengetriebene Ansätze zur mathematischen Modellierung zu bevorzugen. Im vorgestellten Konzept werden Methoden des maschinellen Lernens benutzt, dessen zentrales Element ein speziell ausgelegter Trainingsalgorithmus ist. Dieser Ansatz basiert auf einer Patentanmeldung und wissenschaftlichen Vorarbeiten der Autoren SEIFFERT & BOLLENBECK 2012, BACKHAUS *et al.* 2011 und VILLMANN *et al.* 2013.

In **Abbildung 3** ist exemplarisch ein hyperspektraler Messstreifen nach erfolgter Bildsegmentierung (Pflanze vs. Boden) und Verarbeitung der Daten mit einem zuvor erstellten Kalibrationsmodell gezeigt.

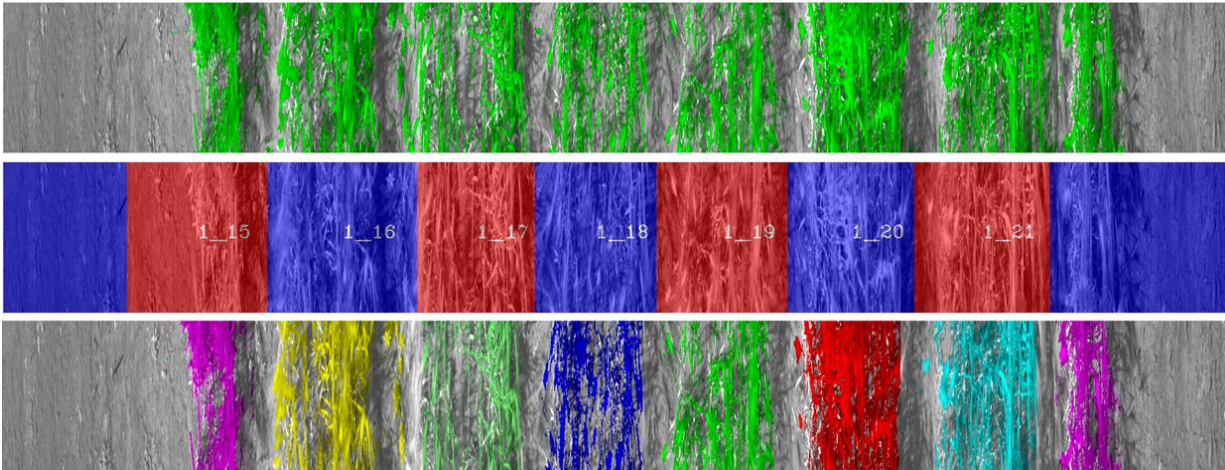


Abbildung 3: Beispiel eines hyperspektral aufgenommenen Messstreifens nach erfolgter Bildsegmentierung Pflanze vs. Boden (oben), logischer Zuordnung zum Layout der Versuchspartikeln (Mitte), und Anwendung des zuvor erstellten Kalibrationsmodells (unten). Der Farbcode im unteren Teil der Abbildung visualisiert die relevanten Eigenschaften des aufgenommenen Pflanzenbestandes (hier: Kategorien des Versorgungszustandes mit verschiedenen Nährstoffen bei Wintergerste).

Literaturverzeichnis

- BACKHAUS A., BOLLENBECK F., SEIFFERT U. (2011):** Robust classification of the nutrition state in crop plants by hyperspectral imaging and artificial neural networks. In: Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). IEEE Press (2011) 9
- SEIFFERT U., BOLLENBECK F. (2012):** Trainingsverfahren für einen adaptiven Auswertalgorithmus, ein hyperspektrales Messgerät, sowie eine Vorrichtung zum Ausbringen eines Betriebsmittels. Europäische Patentanmeldung EP2405258
- VILLMANN T., KÄSTNER M., BACKHAUS A., SEIFFERT U. (2013):** Processing hyperspectral data in machine learning. In Verleysen, M., ed.: Proceedings of the 21. European Symposium on Artificial Neural Networks (ESANN), D-Side Publications (2013) 1-10

Biomasseermittlung mit Leichtbaukopter und Integration in ein Agrarmanagementsystem

Biomass monitoring with unmanned lightweight copter and integration into an agricultural management system

Ludwig Schrenk

CiS GmbH Hansestraße 21, 18182 Bentwisch

E-Mail: lschrenk@cis-rostock.de

Zusammenfassung: Unser Kopter für diese Zwecke ist besonders leicht und deshalb sehr effektiv. Er trägt eine RGB- und eine NIR-Kamera oder eine einfache Multispektralkamera. Mit angeheizten Akkus (40°C) fliegt er auch in der kalten Jahreszeit 30min. In dieser Zeit sind bei 200 m Höhe 100 ha erreichbar.

Nach einer einfachen Flugplanung (Flächenumriss antippen, Flughöhe in m, Überdeckung der Bilder in %) erfolgt der Automatikflug inklusive Start und Landung, gegebenenfalls mit automatischer Unterbrechung zum Akkuwechsel.

Die Automatisierung der Bildauswertung reicht bis zu einer NDVI-Karte des beflogenen Schlages. Diese wird im Fahrspurraster des Schlages zu einer Karte der aktuellen relativen Biomasse, die in unser Agrarmanagementsystem ADAM einfließt. Will man die reale Biomasse ermitteln, werden einige wenige quadratmetergroße Testflächen am Boden abgeschnitten und die gewogenen Massen zur Umrechnung der relativen zur absoluten Biomassekarte genutzt. Diese Biomassekarte kann im ADAM zur Berechnung der eingelagerten Stickstoffmenge und damit zu Stickstoffeinsparungen bei Raps und letztlich zur Applikationskartenermittlung für das Frühjahr genutzt werden (französische Methode).

Für das Getreide wird ähnlich verfahren. Im Agrarmanagement wird aus der relativen Ertragserwartung und dem für den Schlag anvisierten durchschnittlichen Erntemenge pro ha unter Einhaltung der gesetzlichen Bedingungen und Vorschriften die Karte mit dem Gesamtstickstoffbedarf ermittelt. Vor den einzelnen Stickstoff-Gaben wird dann mit dem Kopter die aktuelle relative Biomasse ermittelt und danach die Applikationskarte für diese Gabe unter Beachtung der bereits gemachten Gaben wieder im Fahrspurraster erstellt.

Deskriptoren: UAV, UAS, Drohne, NDVI, relative Biomasse, N-Einlagerung, Applikationskarte, Düngung, Pflanzenschutz

Abstract: *For these purposes, we offer a copter which is extremely lightweight and therefore very efficient. It carries a RGB- and a NIR-camera or a simple multispectral camera. Pre-heated batteries (40°C) allow up to 30 min flight time even during the cold season. During this time and at flight altitudes of 200 m, area coverage of 100 hectare is possible.*

After easy flight planning (tap area polygon, determine flight height and area overlap in percent), automatic flight including takeoff and landing, optionally with automatic interruption for battery replacement, is carried out.

Automated image processing and analysis leads to NDVI maps of the surveyed agricultural field. Our agricultural management system ADAM uses these NDVI values to map the current relative biomass on a driving lane grid of the field. To determine the real biomass, it is necessary to cut crop on test areas of few square meters, weigh the yield and use the results to convert relative biomass to absolute biomass. The software ADAM calculates on the base of this biomass map the stored quantity of nitrogen which can be used to save nitrogen in rape or calculate application maps for spring (French method).

A similar procedure is used for grain. Ensuring compliance with the legal requirements and regulations, the agricultural management system calculates a map for total nitrogen nutrient requirement of the cereal crop type based on varying relative yield expectation and average absolute yield expectation of the field (yield expectation zones). Before applying nitrogen fertilization in the field, the current relative biomass is determined using the copter. Then, the application map is calculated to a driving lane grid considering already realized fertilization.

Keywords: *UAV, UAS, drone, NDVI, relative biomass, N-storage, application map, fertilization, plant protection*

1 Einleitung

Problemstellung, Wissensstand und Ziele der Arbeit

Mit Autopiloten ausgestattete Multicopter gestatten dem Landwirt oder seinem Dienstleister Feldstücke kurzfristig zu befliegen und innerhalb weniger Stunden über den ganzen Schlag und dessen gegebenenfalls auch sehr kleine Teilflächen Aussagen zu treffen (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR 2014). Solch detaillierten, flächendeckenden Auswertungen sind mit terrestrisch betriebenen Sensoren nicht möglich, und weder von Satelliten noch von bemannten Fliegern ähnlich effektiv und schnell erhältlich. Hier soll am Beispiel der Düngung eine Methode und das Zusammenwirken von Agrarmanagementsystem und Flugsystem dargestellt werden.

2 ADAM, das Alternative Digitale Agrar-Management System

Das Programmsystem ist in den letzten 20 Jahren als Grafik- und Sachdatenorientiertes Datenhaltungs- und Verarbeitungssystem für den Precision Farming-Einsatz in Feldbaubetrieben entwickelt worden. Die Entwicklung erfolgte im ständigen Kontakt mit Anwendern, Ämtern und Hochschulen. Es umfasst eine Schlagkartei und sehr hilfreiche und effektive GIS-Funktionen sowie spezielle landwirtschaftliche Funktionalitäten von der Anbauplanung bis zur Düngungsberechnung und teilflächenspezifischem Pflanzenschutz (**Abbildung 1**). In der Datenstruktur werden alle relevanten Daten der Feldstücke getrennt nach allgemeinen und Jahresdaten gehalten.

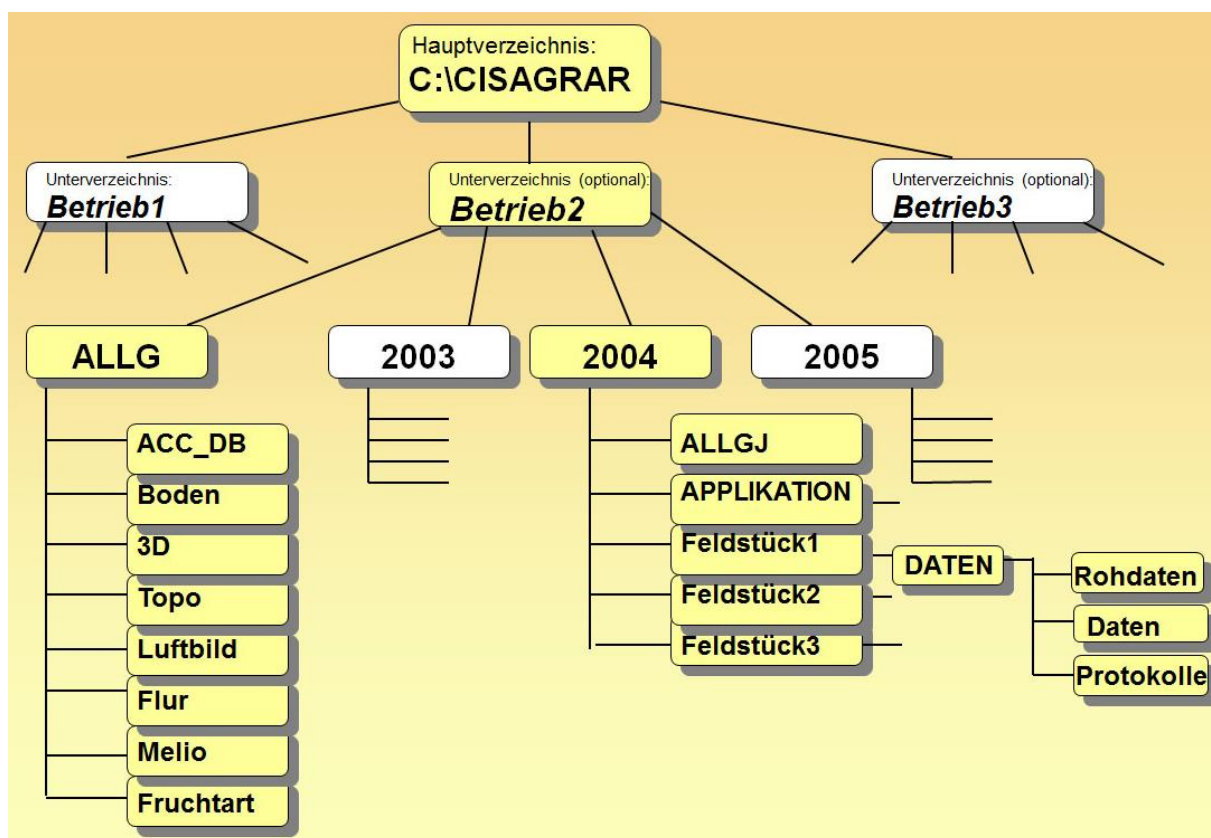


Abbildung 1: Datenstruktur des Agrar-Management-Systems

Eine Methode für die Festlegung der Düngermenge ist die Ermittlung einer teilflächenspezifischen Ertragserwartungskarte aus den Erträgen der Vorjahre die teilflächenspezifisch durch die Mähdrescher aufgezeichnet wurden (**Abbildung 2**). Diese Ertragserwartung ist eine wichtige Kennzahl, aber im Jahresverlauf kann sie sich oft drastisch verändern und mit ihr der Stickstoffbedarf auf den Teilflächen und auf dem Schlag insgesamt.

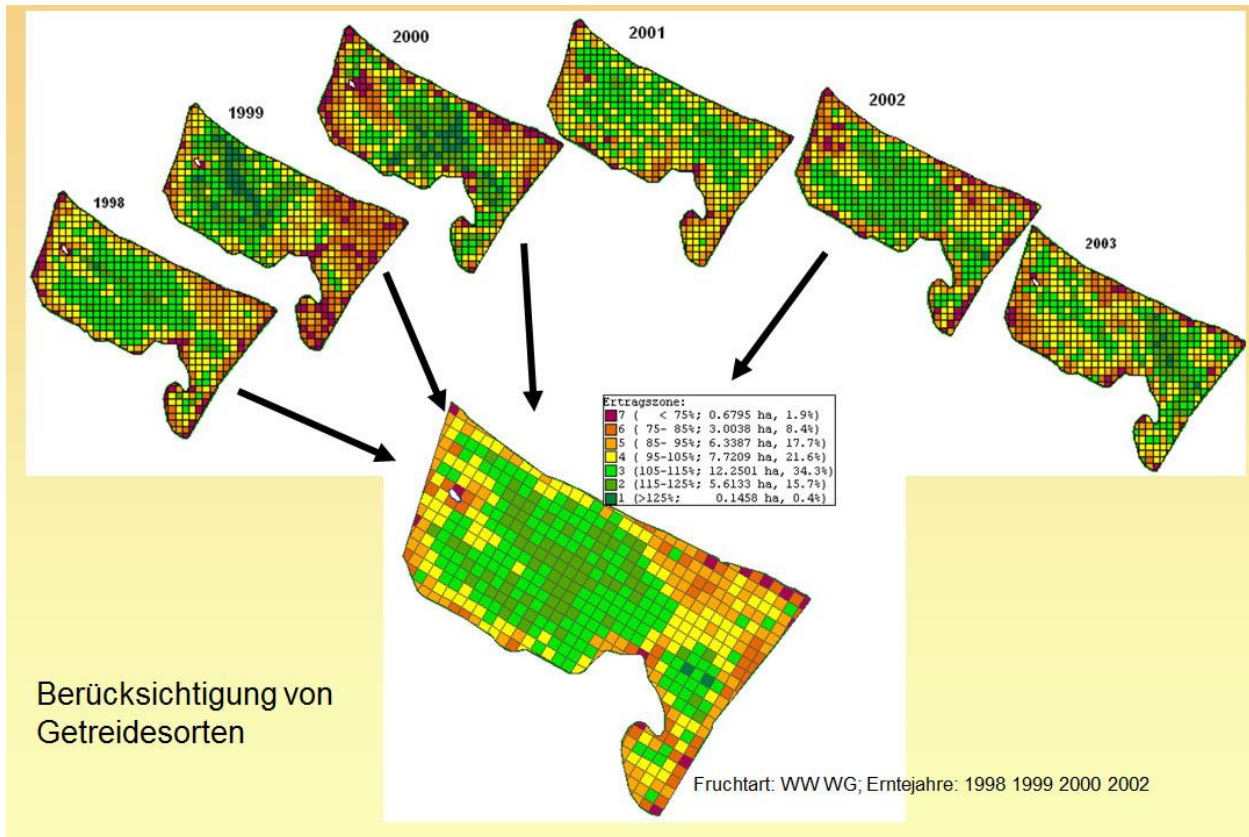


Abbildung 2: Ertragserwartungszonen ermittelt aus Erträgen früherer Jahre

3 Ermittlung der Biomasse

Die Veränderungen des Stickstoffbedarfes wollen wir aus der Biomasse oder der Pflanzenvitalität ableiten und zu deren Bestimmung die Luftbilder des Oktokopters nutzen.



Abbildung 3: Der CiS-Oktokopter

Funktionsumfang des Oktokopters im Automatikflug:

- Start,
- Landung,
- Fläche,
- Polygon,
- Kontur,
- Einzelpunkte und
- Kombinationen

Die Software der Bodenstation

- Flugplanung für die Funktionalitäten des Oktokopters
- Überwachung des Fluges
- Protokollierung des Fluges

Die Flugauswertung

- Bilder zuordnen
- Mosaikieren,
- Geländemodell erarbeiten,
- Orthofotos,
- Fahrspurraster bilden, Wachstumsindizes ermitteln.

Tabelle 1: Wichtige Parameter des UAS

Rotorenzahl	8
Gewicht ohne Zuladung	~2000 g
Flugzeit ohne Zuladung	~45 Min
Flugzeit mit Zuladung	~30 Min
Techn. Flughöhe	~1000 m
Wegpunktanzahl	200
Geschwindigkeit	bis 10 m/s
Windresistenz	bis 10 m/s
Fernsteuerungreichweite	~ 1000 m
Live-View Funkstrecke	5,8 GHz ~500m Reichweite
Live View Bildschirm	7" TFT mit internem Akku
Kameragimbal (wechselbar gegen Gimbal für andere Sensorsysteme z.B. multispektral)	2 Achsen-Servogimbal
Kamera	SONY NEX 5T präpariert u. kalibriert Foto /Video umschaltbar
Motorarme	abnehmbar und steckbar, Motoren: 50 g

Die Bildung der relativen Biomassekarte

Die Reflexion eines grünen Blattes ist im sichtbaren Wellenlängenbereich (400 – 600 nm) relativ gering und liegt bei ca. 10% (Grünlücke). Auffällig ist der Reflexionsanstieg im sichtbaren Grün (ab etwa 550 nm). Das Reflexionssignal steigt im nahen Infrarot (750 – 1300 nm) auf den Maximalwert von ca. 50% und nimmt dann stetig im Bereich des mittleren Infrarot (1300 – 3000 nm) ab.

Auf Basis dieser Reflexionseigenschaften lassen sich verschiedene Vegetationsindizes ableiten. Häufig angewendet ist der NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index). Dieser ist ein "künstlicher" Kanal, der aus den Spektralkanälen berechnet wird. Er repräsentiert die Reflexionsintensität der Vegetation. Man zieht ihn beispielsweise zur Feststellung der Biomasse heran. Es werden neben dem NDVI verschiedene andere Vegetationsindizes berechnet (**Tabelle 2**).

Tabelle 2: Berechnete Vegetationsindizes

$NDVI = (NIR - Rot) / (NIR + Rot)$ <i>Normalized Differenced Vegetation Index</i>	$ENDVI = ((NIR + Green) - 2*BLUE) / ((NIR + Green) + 2*BLUE)$ <i>Enhanced Normalized Differenced Vegetation Index</i>
$BNDVI = (NIR - Blau) / (NIR + Blau)$ <i>Blue Normalized Differenced Vegetation Index</i>	$GNDVI = (NIR - Grün) / (NIR + Grün)$ <i>Green Normalized Differenced Vegetation Index</i>
$VARI = (Grün - Rot) / (Grün + Rot - Blau)$ <i>Variable Atmospherically Resistant Index</i>	
$DVI = NIR - Rot$ <i>Difference Vegetation Index</i>	$RVI = NIR / Rot$ <i>Ratio Vegetation Index</i>

Tabelle 3: Ablauf des Zusammenspiels bei der Ermittlung der Biomasse







Landwirt	Agrarmanagementsystem (bei uns ADAM)	UAV
Zeitpunkt und Flächen für eine biomasseabhängige Düngungs- oder Pflanzenschutzmaßnahme festlegen		
Entscheidung ob relative oder absolute Biomasse erforderlich		
	Bereitstellung von Schlagrändern	
	Bereitstellung von Fahrspurrastern oder Teilflächen-grenzen	
		Flugplanung nach Schlagrand und gewünschter Auflösung
		Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen
		Festlegung von Flughöhe Richtung, Überlappung der Teilbilder
		Flugdurchführung, Automatikflug nach Planung, Überwachung des Fluges und Protokollierung
		Flugauswertung, Bilder zusammensetzen, georeferenzieren
		Ermittlung der relativen Biomasse für die vorgegebenen Teilflächen/Raster
	Errechnen der Applikationskarten nach den teilflächenspezifischen Informationen (Bodenart, Anbau, Ertragserwartung,...) und der aktuellen Biomasse zum Schlag	
Realisieren der Applikation mit einer ISO-Bus-Ausbringmaschine oder unserer Feldsoftware ANVINA einschließlich Ist-Wert-Protokollierung		
	Istwertkarte integrieren und auswerten	



Abbildung 4: Bild von der Flugplanung auf WMS Hintergrund und der möglichen Angaben



Abbildung 5: Bild von der Flugdurchführung

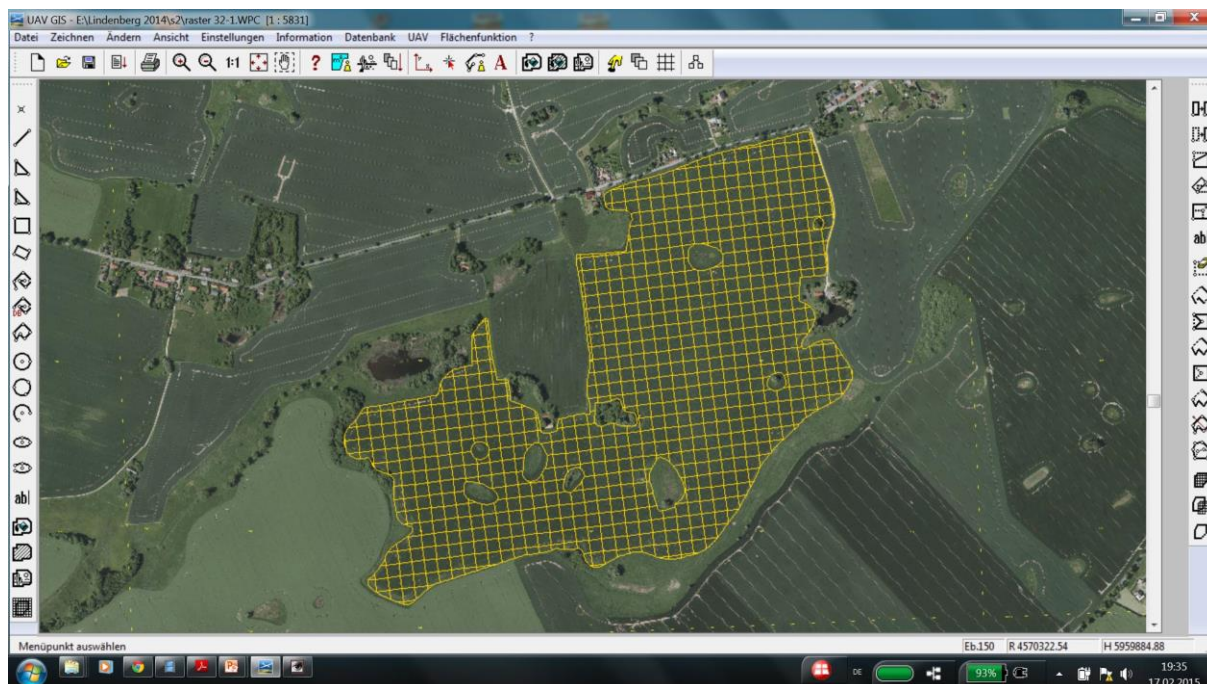


Abbildung 6: Fahrspurraster aus ADAM

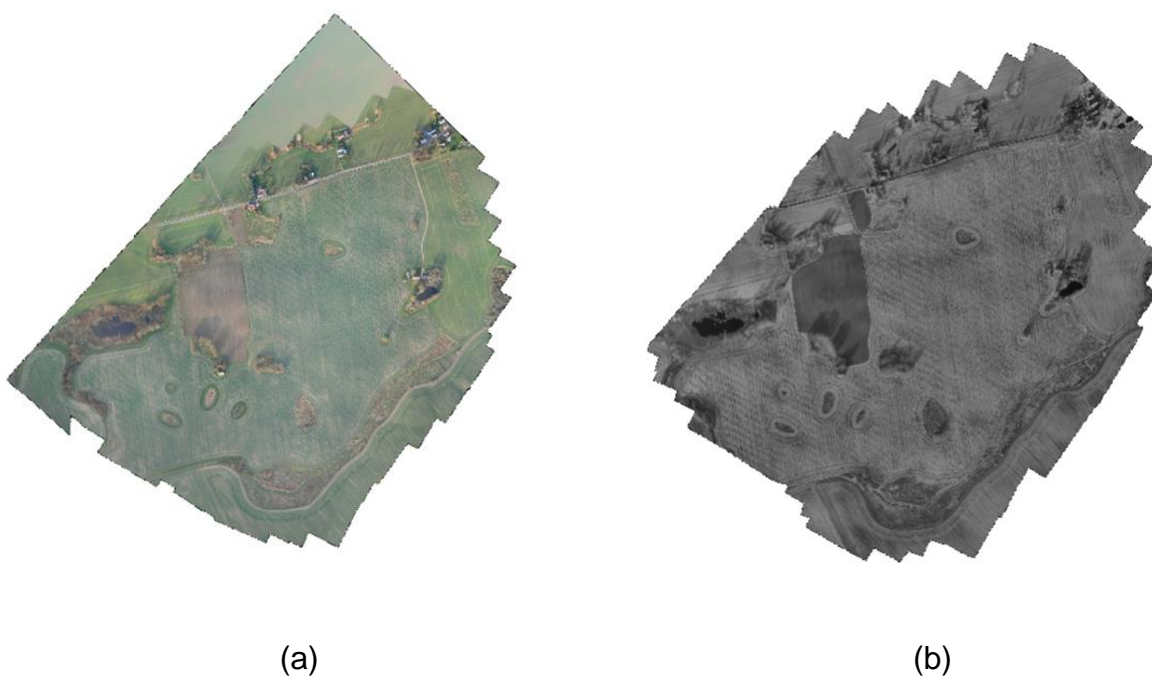


Abbildung 7: Aus Einzelbildern zusammengesetztes
(a) RGB- und (b) NIR-Bild in Graustufen.

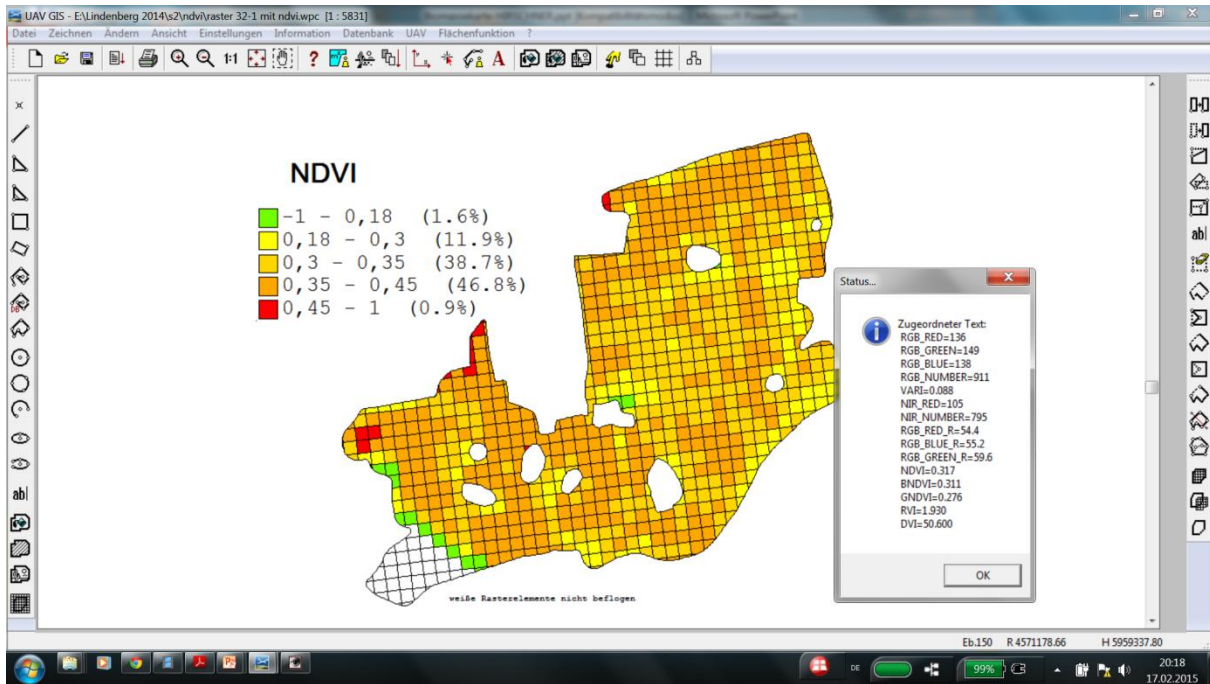


Abbildung 8: Aus beiden Bildern verrechnete Werte im Fahrspurraster



Abbildung 9: Die Weiterverarbeitung zur absoluten Biomassekarte

4 Stickstoffeinsparung im Frühjahr

Nach dem französischen Modell kann ADAM den N-Bedarf des Raps im Frühjahr aus der absoluten Biomasse ermitteln, weil der im Herbst eingelagerte Stickstoff sich proportional zur Biomasse verhält (KAGE 2008, MEHL *et al.* 2009) und zu 70% im Frühjahr angerechnet werden kann (**Abbildung 10**).

Weiter kann ADAM die Applikationskarten nach Vorgabe für die einzelnen N-Gaben berechnen, an die Ausbringmaschine geben und letztlich das Protokoll der Ist-Werte in das Datenmodell aufnehmen.

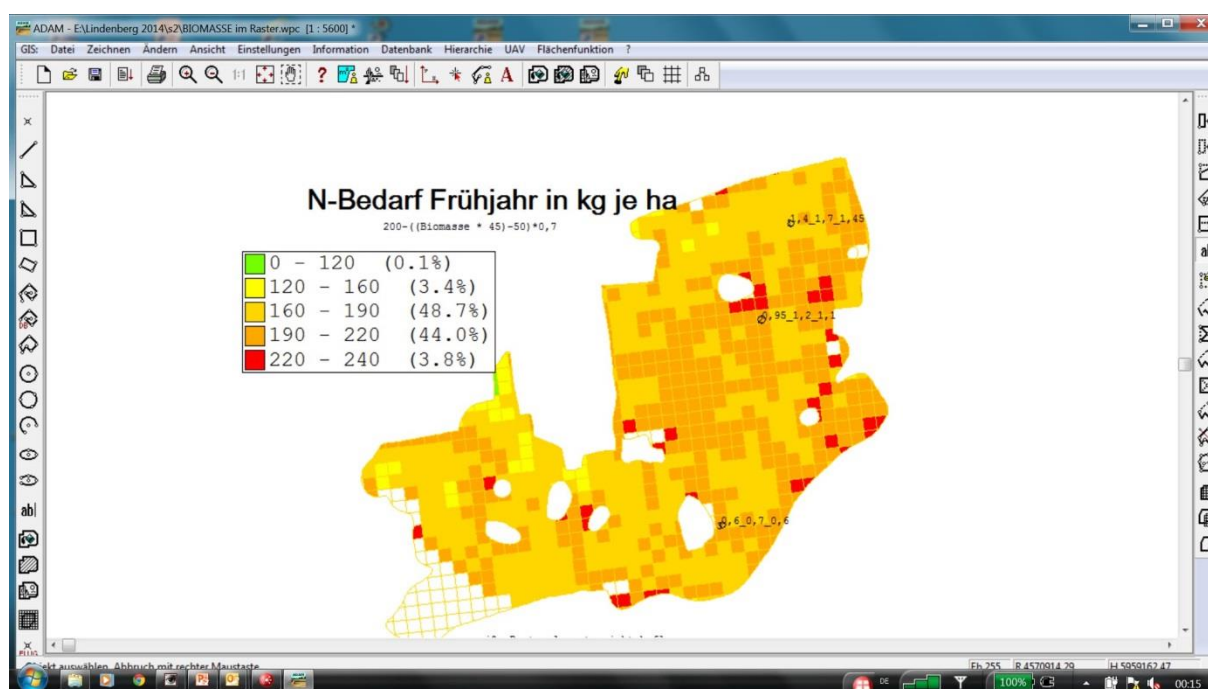


Abbildung 10: Finale Applikationskarte aus der Basis des N-Bedarfs nach dem französischen Modell

Literaturverzeichnis

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2014): „Kurzinformation –über die Nutzung von unbemannten Luftfahrtsystemen“, Januar 2014

KAGE H. (2008): Institut f. Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung Kiel, Aktuelle Ergebnisse zur Rapsdüngung unter Berücksichtigung der Frischmasse, Februar 2008

MEHL D., STEINHÄUSER A., KOCH F., KÜCHLER A. (2009): Regionalisierung der Nährstoffbelastung in Oberflächengewässern in Mecklenburg-Vorpommern. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (5): 336-341

ThünoCopter – ein Mehr-Kamera-System für landwirtschaftliche Fragestellungen

ThünoCopter – a multi copter system for agriculture issues

Heiko Neeland, Tina Langkamp, Martin Kraft

Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig,
E-Mail: heiko.neeland@thuenen.de

Zusammenfassung: Der Einsatz von UAS in der Landwirtschaft findet zunehmend Interesse. Trotz der sich rasch entwickelnden Technologie und des immer größeren Marktangebotes können jedoch bisher viele landwirtschaftliche Fragestellungen nicht beantwortet werden. Der Beitrag informiert über Voraussetzungen und Erfahrungen bei der Auswahl und Integration unterschiedlicher Kameras am ThünoCopter zur Fernerkundung landwirtschaftlicher Flächen. Schwerpunkt ist dabei die Messung und Berechnung spektraler Indizes sowie die Messung der exakten Bestandstemperatur mit Hilfe eines einzigen Flugplans. Verschiedene Auswahlkriterien (räumliche Auflösung, technischer Support, elektronische und mechanische Integration, Öffnungswinkel der Objektiv, Gewicht, Energiebedarf, etc.) führten zum Entschluss, die 4-Kanal Spektral-Kamera von VRmagic, die Thermal-Kamera Bobcat640-GigE und die SWIR-Kamera Gobi640-GigE von Xenics zu verwenden. Die 4-Kanal Spektral-Kamera wurde mit Objektiven von Kowa und mit Filtern von Edmund Optics erweitert, sodass mit einem RGB-, 670 nm-, 840 nm- und 970 nm-Kanal gearbeitet werden kann. Für die SWIR-Kamera Gobi640-GigE stehen Filter im Wellenlängenbereich von 1250 nm und 1600 nm zur Verfügung. Neben dem bekannten NDVI können nun auch Indizes wie NDWI, NDII, NWI, SRWI, MSI und SAVI berechnet werden.

Deskriptoren: Anforderungen, Erfahrungen, Integration, UAS, Bobcat, Gobi, Xenics Linux, Ubuntu, Mehr-Kamera-System, VRmagic, MinnowBoard-Max

Abstract: *The use of UAS is increasingly popular in agriculture. In spite of fast-moving technology and rapid growing market offer, a lot of agriculture issues cannot be answered. The aim of this contribution is to set out the conditions and experiences in the selection and integration of different cameras for remote sensing in agriculture. The main focus has been on the measuring and calculation of spectral indices and measuring of true canopy temperature with one flight plan as well. Different selection criteria (spatial resolution, technical support, electronic and mechanic integration, opening angle of lens, weight, energy consumption etc.) have led to the decision to invest in the multi-spectral camera of VRmagic and in the thermal camera Bobcat640-GigE and*

SWIR camera Gobi640-GigE of Xenics. The multi-spectral camera has been expanded with lenses of Kowa and filters of Edmund Optics, so that an RGB channel, 650 nm channel, 850 nm channel and 970 nm channel work. For the SWIR camera are two channels available, one is a 1250 nm and the other is a 1600 nm channel. In addition to the known vegetation index NDVI indices such as NDWI, NDII, SRWI, MSI and SAVI can also be calculated.

Keywords: requirements, experiences, integration, UAS, Bobcat, Gobi, Xenics, Linux, Ubuntu, multi sensor camera, VRmagic, MinnowBoard-Max

1 Einleitung

Ein Einsatz von „Unmanned Aerial Systems“ (UAS) in der Landwirtschaft ist keine Seltenheit. Was als „precision farming“ mit schleppergestützten Systemen in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts angefangen hat (REICHARDT 2010), wird kontinuierlich und sukzessiv zu fahrenden und fliegenden Plattformen weiterentwickelt. UAS erlangen jedoch auch immer mehr politische Aufmerksamkeit. Für UAS bis zu einem Maximalgewicht von 5 kg muss im deutschen Luftraum eine Allgemeinerlaubnis für den Aufstieg beantragt werden. Das Fliegen mit Plattformen von einem Gewicht über 5 kg oder mit einem Verbrennungsmotor ist nur mit einer Einzelerlaubnis möglich (NLSTBV 2016). Es zeigt sich jedoch, dass Befliegungen von Versuchsfeldern wetterabhängig sind und spontan durchgeführt werden, was mit einer Einzelerlaubnis schwierig ist. Es werden daher oft UAS mit einem Gewicht von unter 5 kg verwendet. Durch ihre geringe Zuladung sind jedoch nicht beliebig viele Sensorkombinationen möglich und auch das Gewicht der Akkus, die sowohl die Plattform als auch die Sensoren versorgen sollen, ist zu beachten. Am Thünen-Institut für Agrartechnologie wurde der ThünoCopter für landwirtschaftliche Fragestellungen weiterentwickelt, welcher den gesetzlichen Anforderungen entspricht und mit einem Mehr-Kamera-System ausgestattet ist. Bis dahin war es ein langer Weg mit Problemen in der Entwicklung, Programmierung und Integration von Kamera-Systemen auf die in diesem Beitrag weiter eingegangen wird.

2 Material und Methoden

Als schwierig erwies sich die Wahl geeigneter Bildsensoren. Es sollten Sensoren verwendet werden, die sowohl den RGB- als auch den NIR- und SWIR-Bereich abdecken und mit einer Thermal-Kamera kompatibel sind. Die Liste der Auswahlkriterien war lang und erstreckte sich von der Empfindlichkeit über die räumliche Auflösung, technischen Support, elektronische und mechanische Integration, Öffnungswinkel der Objektive, Gewicht, Energiebedarf bis hin zur Winkelabhängigkeit der Filter.

Erfassung und Berechnung der Vegetationsindizes

Die Beantwortung landwirtschaftlicher Fragestellungen mit Hilfe der Fernerkundung beruht auf der spektralen Reflexion der Pflanzen. Die spektrale Reflexion von gesunden Pflanzen unterscheidet sich deutlich von nicht gesunden Pflanzen. Gesunde Pflanzen weisen eine geringe Reflexion im blauen, etwas höhere Reflexion im grünen, sehr geringe Reflexion im roten und sehr hohe Reflexion im nah-infraroten Bereich auf (GENC *et al.* 2013). Zudem absorbieren bestimmte Pflanzeninhaltsstoffe Strahlung nur in bestimmten Wellenlängenbereichen (CURRAN 1989). Die Vergangenheit zeigte, dass einige Bereiche stärker auf verschiedene Umwelteinflüsse reagieren als andere und dass sich der Quotient aus verschiedenen Wellenlängenbereichen als Vegetationsindex eignet. Daraus ist auch der bekannte Vegetationsindex Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) nach ROUSE (1974) entstanden. Weitere Indizes die mit dem ThünoCopter erfasst werden sollen, sind der Normalized Difference Water Index (NDWI), der Normalized Difference Infrared Index (NDII), der Normalized Water Index (NWI), der Simple Ratio Water Index (SRWI), der Moisture Stress Index (MSI) und der Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Bekannte Vegetationsindizes zur Beantwortung landwirtschaftlicher Fragestellungen.

Index	Formel	Referenz
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI = $(\text{NIR}-\text{red})/(\text{NIR}+\text{red})$	ROUSE <i>et al.</i> (1974)
Normalized Difference Water Index	NDWI = $(R_{860}-R_{1240})/(R_{860}+R_{1240})$	GAO (1996)
Normalized Difference Infrared Index	NDII = $(R_{860}-R_{1640})/(R_{860}+R_{1640})$	DASGUPTA <i>et al.</i> (2007)
Normalized Water Index	NWI = $(R_{970}-R_{850})/(R_{970}+R_{850})$	BABAR <i>et al.</i> (2006)
Simple Ratio Water Index	SRWI = (R_{860}/R_{1240})	GUTIERREZ <i>et al.</i> (2010)
Moisture Stress Index	MSI = (R_{1600}/R_{820})	AL-MOUSTAFA <i>et al.</i> (2012)
Soil-Adjusted Vegetation Index	SAVI = $((\text{NIR}-\text{red})/(\text{NIR}+\text{red}+L))*(1+L)$	HUETE (1988)

Die in **Tabelle 1** dargestellten Indizes überschneiden sich in einigen Wellenlängenbereichen oder genaue Wellenlängenangaben wurden nicht angegeben, da die Autoren mit Satelliten arbeiteten. Es würde sich daher anbieten, mit Hyperspektralkameras von Cubert und Rikola zu arbeiten, jedoch nehmen diese Systeme nur die spektrale Reflexion bis zu 950 nm auf (CUBERT 2016, RIKOLA 2016) und lagen über dem verfügbaren Budget. Hinzu kommt die Anforderung, dass landwirtschaftliche Versuchsanlagen mehrfach zu unterschiedlichen Vegetationsstadien überflogen werden sollen und dass die Aufnahmen mittels Bildanalyseverfahren mit den zugehörigen GPS-Koordinaten aus-

gewertet werden sollen, um eine Georeferenzierung zu ermöglichen. Um das zugelassene Gesamtgewicht des Kopters von 5 kg nicht zu überschreiten, musste die benötigte Anzahl der Wellenlängenbereiche beschränkt werden, ohne einen der genannten Vegetationsindizes zu vernachlässigen. Dies ist für den Bereich zwischen 820 nm und 860 nm möglich, weil die spektrale Reflexion von Getreide und Boden zeigt, dass hier ein NIR-Plateau vorliegt (OLLINGER 2011) und dieses unempfindlich gegenüber Änderungen im Wassergehalt ist (ZARCO-TEJADA *et al.* 2003). Davon lässt sich ableiten, dass die Reflexion bei 850 nm auch für die Berechnung des MSI verwendet werden kann. Weiterhin ist unbekannt, welche genaue Wellenlänge im roten Bereich für die Berechnung des NDVI benötigt wird. ROUSE *et al.* (1974) beziehen sich auf das Band 2 (600 – 700 nm) des Satelliten Landsat 4-5 (USGS 2016). JONES *et al.* (2004) verwenden die Reflexion bei 640 nm, MONTEIRO *et al.* (2012) und ZARCO-TEJADA *et al.* (2012) verwenden die Reflexion bei 670 nm und PEÑUELAS *et al.* (1997a); PEÑUELAS *et al.* (1997b) und SIMS & GAMON (2003) verwenden die Reflexion bei 680 nm, welches als das Absorptionsmaximum von Chlorophyll a gilt (SITTE *et al.* 2002). OLLINGER (2011) zeigt hingegen bei einer simulierten Reflexionskurve, dass der Bereich zwischen 550 nm und 650 nm stärker auf unterschiedliche Chlorophyllgehalte reagiert als das Absorptionsmaximum bei 680 nm. Auch das Band 1 des Satelliten MODIS ist von 620 nm bis 670 nm empfindlich (NASA 2016). Um alle die in **Tabelle 1** aufgeführten Indizes berechnen zu können, wird die Reflexion bei 650 nm, 850 nm, 970 nm, 1250 nm und 1600 nm benötigt. Für alle gewählten Indizes ist jedoch zu beachten, dass das vom Pflanzenbestand reflektierte Licht im Wesentlichen durch den Stand der Sonne, dem Abstand zur Kamera sowie deren Öffnungswinkel (RAHMAN *et al.* 2015) negativ beeinflusst wird. Je nach Einstrahlwinkel ist der Anteil von direkter und diffuser Einstrahlung unterschiedlich; aber auch der Betrachtungswinkel hat einen Einfluss.

Technische Anforderungen an eine RGB- und SWIR-Kamera

Die räumliche Auflösung ist entscheidend, wenn nach Fragestellung möglichst detaillierte Aufnahmen gemacht werden sollen. Eng verknüpft damit ist auch der Öffnungswinkel der gesamten Kamera, der wiederum die Flughöhe beeinflusst. Nur mit weitwinkeligen Objektiven können mit einer einzigen Aufnahme große Flächen abgedeckt werden, wenn eine Flughöhe von maximal 100 m eingehalten werden soll. Je weitwinkeliger ein Objektiv jedoch ist, desto größer sind die Betrachtungswinkel des reflektierten Lichts vom Pflanzenbestand in einer Aufnahme. Zudem hat sich gezeigt, dass durch die Vibrationen von UAS, Aufnahmen mit kommerziellen Multi-Sensor-Kameras durch den Rolling-Shutter-Effekt massiv beeinflusst werden können (GEHRKE & GREIWE 2013). Abhilfe kann geschafft werden, wenn Kameras mit Global-Shutter verwendet werden. Ein Kriterium für die Qualität der Pixel einer Aufnahme ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, das möglichst hoch sein sollte, um auch kleinste Änderungen des Lichts vom Rauschen unterscheiden zu können. Der technische Support sowie gute Datenblätter sind besonders wichtig, wenn Mess-Systeme selbst entwickelt, getestet und in Betrieb genommen wer-

den sollen. Dabei sollten auch die Möglichkeiten für elektronische und mechanische Integration in ein UAS-System geprüft werden.

Eine weitere technische Einschränkung, die hohe Aufmerksamkeit erlangt hat, war der Einfluss des Einfallswinkels auf das Bandpassverhalten von Interferenz-Filtern. Nach VISION.DOKTOR (2015) verschiebt sich die zentrale Wellenlänge mit zunehmendem Einfallswinkel der eintreffenden Strahlung auf die Glasoberfläche hin zu kürzeren Wellenlängen. Bei einer Zentralwellenlänge von 650 nm, einem Einfallswinkel AOI von 25° und einer Umgebungstemperatur von 22°C verschiebt sich die Zentralwellenlänge auf 623 nm (SPECTROGON 2016). Dies kann vor allem bei sehr scharfkantigen Bandpassfiltern in Kombination mit sehr weitwinkligen Objektiven auftreten, wie sie am ThünoCopter verwendet werden sollen, und zu negativen Effekten führen. Diese negativen Effekte äußern sich in einer Abschattung des Bildrandes, da schräge Einfallswinkel die Filterwirkung so verschieben können, dass der Bandpassfilter den Wellenlängenbereich des Lichts blockiert, der eigentlich durchgelassen werden soll (VISION.DOKTOR 2015). Eine Möglichkeit diesen negativen Effekt zu umgehen, wäre mit Bandpassfiltern zu arbeiten, die höhere Zentralwellenlängen aufweisen, damit am Bildrand nicht der gewünschte Bereich blockiert wird. Jedoch hat dies den Nachteil, dass die Bildmitte nicht der gewünschten Wellenlänge entspricht. Die zweite Möglichkeit die Verschiebung der Zentralwellenlänge zu umgehen ist, mit mehreren Aufnahmen pro Flugbahn zu arbeiten. Damit wird ein höherer Überlappungsbereich erzielt und nur die Pflanzenbestände in der Bildmitte werden bei der Auswertung berücksichtigt. Außerdem sollten die Verzerrungen der Objektive ebenfalls gering gehalten werden. Eine Abschattung des Bildes ohne Verschiebung der Zentralwellenlänge sowie Verzerrungen lassen sich jedoch mittels OpenCV herauszurechnen (NEELAND & KRAFT 2013). Es ist aber sinnvoll solche Effekte möglichst schon bei der Auswahl der Kameras und Objektive gering zu halten.

Exakte Messung der Bestandstemperatur

Für die Beantwortung landwirtschaftlicher Fragestellungen erlangt die Messung der exakten Bestandstemperatur und insbesondere der Blätter in der Pflanzenzucht zunehmend an Bedeutung (VADIVAMBAL & JAYAS 2010). Um die exakte Bestandstemperatur erfassen zu können, muss die gesamte Messkette (Eigenschaften der Oberfläche des Messobjekts bis hin zur Temperatur des Kamerasensors) nach Möglichkeit bekannt sein. Allgemein gilt:

$$\begin{aligned}\varepsilon + \rho + \tau &= 1 \\ \rho &= 1 - \varepsilon\end{aligned}$$

Die Reflexion ρ und Emissivität ε hängen voneinander ab und nur für einen idealisierten schwarzen Strahler ist die Reflexion $\rho = 0$, wenn $\varepsilon = 1$ ist. Nur in diesem Fall ist die Energie vom schwarzen Strahler E_{SS} gleich der des Messobjekts E_M , sonst gilt:

$$\varepsilon = \frac{E_M}{E_{SS}}$$

In der **Abbildung 1** ist das Prinzip der Temperaturmessung mittels Thermal-Kamera zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die gesamte Energie, die durch die Öffnung des Objektivs der Kamera gelangt, wie folgt zusammensetzt:

$$E_{Ges,O} = \tau_R [\varepsilon_M E(T_M) + (1 - \varepsilon_M) E(T_H)] + (1 - \tau_R) E(T_R)$$

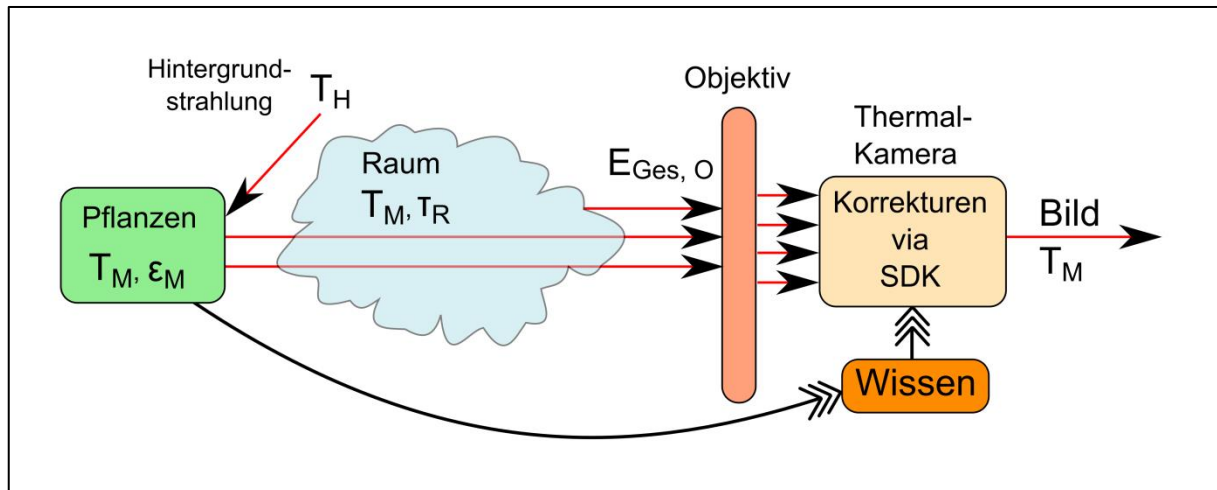


Abbildung 1: Prinzip der Infrarot-Temperatur-Messung mit Thermal-Kamera nach (FLIR 2016).

Die gemessene Energie des Pflanzenbestands beinhaltet als Messfehler noch die Energie, die vom Raum zwischen Kamera und Messobjekt emittiert wird, und die Hintergrundstrahlung $E(T_H)$, die sich nicht herausrechnen lässt, aber z.T. schon von einer Kamera intern herausgefiltert wird. Die Dämpfung τ_R innerhalb des Raums zwischen Kamera und Pflanzenbestand lässt sich jedoch herausrechnen. Die internen Korrekturen und Umrechnungen der Kamera wie z.B. die radiometrische Kalibrierung ($E_{Ges,O} \rightarrow T_M$) lassen sich mit der jeweiligen Software oder mit dem SDK des Herstellers online durchführen, die aber auf Eigenschaften des Raums und des Messobjekts aufsetzt. Manche Kameras liefern direkt eine Temperatur.

Technische Anforderungen an eine Thermal-Kamera

Die technischen Anforderungen an eine Thermal-Kamera sind ähnlich wie für die SWIR-Kamera und wie für eine RGB-Kamera. Hinzu kommen jedoch zwei entscheidende Auswahlkriterien: Zum einen ist die Temperaturempfindlichkeit und zum anderen die Messunsicherheit der Temperatur entscheidend. Ohne Korrektur der Hintergrundstrahlung $E(T_H)$ hat eine Änderung der eingestellten Emissivität ε_M von nur 1% (z.B. von 0.97 auf 0.98) zur Folge, dass die gemessene Temperatur für 300 K schon um 0,75 K verfälscht ist (JONES *et al.* 2004). Bei einer Messunsicherheit der Kamera von ± 2 K erhöht sich so die Messunsicherheit auf $\pm 2,75$ K. Das macht deutlich, wie wichtig es ist, die Emissivität ε_M eines Pflanzenbestands genau zu kennen, um den Fehler der Hinter-

grundstrahlung $E(T_H)$ möglichst gering zu halten. Die Temperaturempfindlichkeit hingegen ist besonders wichtig, wenn innerhalb einer Aufnahme geringe Temperaturunterschiede ΔT_M untersucht und ausgewertet werden sollen. Wie für die Bestimmung der spektralen Indizes haben auch der Stand der Sonne und der Betrachtungswinkel der Kamera einen Einfluss auf eine exakte Temperaturmessung. Ein optimaler Betrachtungswinkel aus definierter Himmelsrichtung kann bislang nicht angegeben werden (PRASHAR & JONES 2014). Deshalb sollte die Thermal-Kamera am ThünoCopter schwenkbar sein. Am Markt werden vielfach Kameras ohne radiometrische Kalibrierung verkauft. Bei diesen Modellen muss sich der Anwender selbst um eine Kalibrierung kümmern oder muss auf absolute Temperaturwerte verzichten. Je besser die interne radiometrische Kalibrierung - also Bestimmung der Temperatur - der Kamera ist, desto größer sind jedoch auch Gewicht und Preis der Kamera.

3 Ergebnisse und Diskussion

Eine ausführliche Literatur- und Marktrecherche führte dazu, in eine Multi-Sensor-Kamera von VRmagic zu investieren, da diese schon eine Hardware für ein Linux-Betriebssystem zur Bilddatenspeicherung integriert hat. An die D3-Plattform können bis zu vier Sensorplatinen angeschlossen werden (VRMAGIC 2016). Der integrierte Chip des Typs Aptina MT9V024 besitzt eine Auflösung von 752 x 480 Pixel und ist im Bereich von 350 nm bis 1050 nm empfindlich. Zudem verfügt sie über einen elektronischen Global-Shutter (ONSEMI 2016). Mit dieser Kamera ist es möglich, die gewünschten Bereiche um 650 nm, 850 nm und 970 nm sowie einen RGB-Kanal abzudecken. Die Sensorplatine für den RGB-Kanal ist mit einem RGB-Bayer-Color-Filter ausgestattet und die drei anderen Kanäle sind monochrom und wurden mit hartbeschichteten Bandpassfiltern von Edmund Optics ausgestattet. Auf Grund der Temperatur- und Winkelabhängigkeit wurden Filter mit einer Zentralwellenlänge von 650 nm, 850 nm und 975 nm, alle mit einer Halbwertsbreite von 50 nm, ausgewählt (EDMUND.OPTICS 2016b). Eine Markterkundung ergab, dass Hersteller und Online-Händler wie Semrock, ThorLabs und Andover Filter im gewünschten Wellenlängenbereich anbieten, jedoch haben Durchmesser, Dicke und Transmission nicht zu den gestellten Anforderungen gepasst und waren daher nicht kompatibel zu den gewählten Objektiven und den Sensorplatinen. Des Weiteren wurde in vier hochwertige Objektive des Herstellers Kowa mit einer Brennweite von $f = 5$ mm und einer Verzerrung $\leq 0,5\%$ investiert. Zwei Objektive des Typs LM5JC1M (KOWA 2016a) für den RGB- und 650 nm-Kanal und zwei Breitbandobjektive des Typs LM5JC10M (KOWA 2016b) für den 850 nm- und 975 nm-Kanal. Die Objektive besitzen ein M46- oder M40-Filtergewinde.



Abbildung 2: ThünoCopter mit Multi-Sensor-Kamera von VRmagic und Objektiven von Kowa zur Befliegung von landwirtschaftlichen Versuchsflächen und Erfassung der spektralen Reflexion im RGB- und NIR-Bereich.

Da der ThünoCopter mit Multi-Sensor-Kamera und allem benötigten Zubehör die maximale Zuladung erreicht hat, aber noch nicht der SWIR- und Thermalbereich abgedeckt war, wurde ein zweiter ThünoCopter aufgebaut. Dieser wurde mit der Thermal-Kamera Gobi-640-GigE und der SWIR-Kamera Bobcat-640-GigE von Xenics ausgestattet. Beide Kameras haben eine Auflösung von 640 x 480 Pixel und verfügen über dasselbe SDK. Die Thermal-Kamera misst im Bereich von 8 μm bis 14 μm . Sie weist eine Temperaturempfindlichkeit von 50 mK auf und eine Messunsicherheit von ± 2 K bzw. 2% wird vom Hersteller garantiert (XENICS 2016b).

Die SWIR-Kamera ist eine gekühlte InGaAs-Kamera und ist empfindlich im Bereich von 900 nm bis 1700 nm (XENICS 2016a). Sie wurde mit einem 16 mm Objektiv ausgestattet (XENICS 2016c) und mit Hilfe von Adaptern können Filter mit einer Zentralwellenlänge von 1250 nm und 1600 nm von Edmund Optics (EDMUND.OPTICS 2016a) zwischen Objektiv und Kamera fixiert werden, ohne die Brennweite stark zu verändern. Da jedoch nicht in zwei SWIR-Kameras investiert werden konnte, um bei jedem Flug die Reflexion beider Wellenlängen zu erfassen, muss das Filter nach einem Flug getauscht werden.



Abbildung 3: Thermal-Kamera Gobi-640-GigE und SWIR-Kamera Bobcat-640-GigE von Xenics.

Während der Entwicklungsphase bestand die erste Herausforderung darin, eine geeignete eingebettete x86-Plattform zu finden, die UAS-tauglich (leicht, klein und geringer Energieverbrauch) ist und zudem über eine GigE-Schnittstelle verfügt. Als geeignet hat sich das Open-Source Hardware- und Software-Projekt MinnowBoard-Max (MINNOWBOARD 2016) erwiesen.

Die Inbetriebnahme beider Xenics-Kameras für den Flugbetrieb hat große Schwierigkeiten bereitet bei der Installation von Ubuntu 12.04.5 LTS und bei der Programmierung der Gobi-640-GigE Kamera. Die Installation von Ubuntu 12.04.5 LTS als Server-Variante ohne grafische Oberfläche auf dem MinnowBoard-Max gestaltete sich als schwierig, da nach mehrfachem Testen nur die Installation mit externem USB-CD-Laufwerk ohne Abbruch funktionierte. Das SDK von Xenics sowie eine gesamte minimale IDE konnten ohne Probleme auf dem MinnowBoard-Max installiert werden. Sehr große Schwierigkeiten hat die Entwicklung für das Programm bereitet, das im Flug die Temperaturmessung mit der Gobi-640-GigE Kamera durchführen soll, weil es sehr instabil lief. Das Problem konnte behoben werden, indem ein Delay von 19 μ S zwischen den gesendeten Datenpaketen auf der GigE-Vision-Layer eingeführt wurde, damit eine stabile Netzwerkverbindung zwischen der Gobi-640-GigE-Kamera und dem MinnowBoard-Max erreicht werden konnte. Das Delay kann in der Gobi-GigE eingestellt werden. Die mechanische und elektronische Integration konnte mit Standard-Bauteilen und -Materialien, wie DC-DC-Wandlern bzw. Aluminium durchgeführt werden. Damit eine Temperaturmessung nicht nur senkrecht zum Bestand möglich wird, wurden die Kameras jeweils in einem Gimbal verbaut. Eine externe Triggerung erlaubt es, sowohl kontinuierlich als auch an bestimmten Wegpunkten Bilder aufzunehmen. Das gilt auch für die Bobcat-GigE-Kamera und für die VRmagic-Kamera.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die technischen Eigenschaften des Mehr-Kamera-Systems am ThünoCopter.

Tabelle 2: Eigenschaften des Mehr-Kamera-Systems am ThünoCopter in 50 m Flughöhe.

Kamera	Auflösung [px x px]	Brennweite [mm]	HFOV [°]	VFOV [°]	Bild Breite [m]	Bild Länge [m]	Pixel Breite [mm]	Pixel Länge [mm]
D3-Kamera (VRmagic)	758x480	5	48,55	32,1	48,6	32,1	54,7	55,2
Gobi640-GigE (Xenics)	640x480	15	39,9	30,4	36	27	56,7	56,7
Bobcat-GigE (Xenics)	640x480	16	43,6	35,5	40	32	62,5	62,5

Erste Messungen

Am Thünen-Institut Standort Braunschweig befand sich in der Vegetationszeit von 2015 eine Weizenversuchsanlage. 16 Genotypen wurden unter Trockenstress und bewässerten Bedingungen getestet. Die **Abbildung 4** zeigt eine Aufnahme der bewässerten Variante.

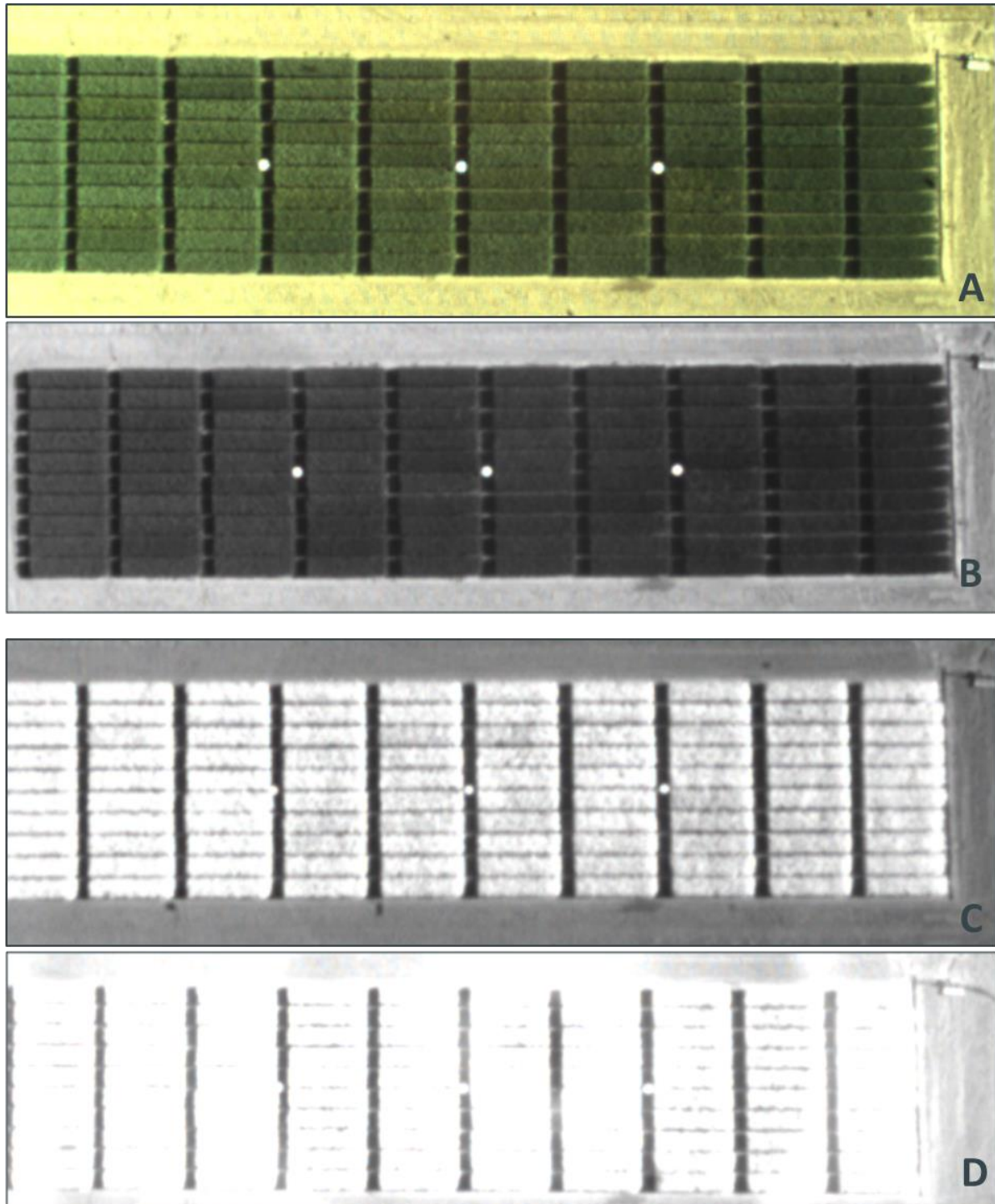


Abbildung 4: Aufnahme eines Parzellenversuchs (Weizen) mit RGB-Kanal (A), 650 nm-Kanal (B), 850 nm-Kanal und 975 nm-Kanal.

In A ist eine Aufnahme mit dem RGB-Kanal, in B eine Aufnahme mit dem 650 nm-Kanal, in C eine Aufnahme mit dem 850 nm-Kanal und in D eine Aufnahme mit dem 970 nm-Kanal dargestellt. Die **Abbildung 4 A, B** und **C** sind gut belichtet, und vereinzelt sind Unterschiede der Parzellen schon mit dem bloßen Auge erkennbar. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Helligkeit in den Bildern von links nach rechts (von Ost nach West) abnimmt. Ob dieser Effekt auf den Sonnenstand zurückzuführen ist, muss noch geprüft werden.

Die **Abbildung 4 D** (970 nm-Kanal) ist überbelichtet und ein deutlicher Ring ist in auf der Aufnahme zu erkennen. Versuche die Belichtungszeit zu verändern, zeigten bislang keine Verbesserung.

4 Ausblick

Das System soll 2016 weiter überarbeitet, getestet und verbessert sowie optimal eingestellt werden. Die optimale Belichtungszeit der VRmagic-Kamera soll später entweder aus Daten einer externen Helligkeitsmessung oder aus aufgenommenen Bilddaten ermittelt werden. Das Problem mit den Ringen im 970 nm-Kanal soll durch eine modifizierte optische Anordnung behoben werden. Sowohl mit der VRmagic-Kamera als auch mit den Xenics-Kameras sollen in diesem Jahr umfangreiche Messungen durchgeführt werden. Für alle drei Kameras ist es nun auch möglich, den Einfluss des Aufnahmewinkels und des Sonnenstands auf Messungen zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

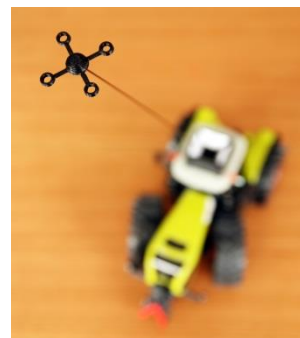
- AL-MOUSTAFA T., DANSON F.M., ARMITAGE R. (2012):** Mapping fuel moisture content in upland vegetation using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 127, 74-83
- BABAR M.A., REYNOLDS M.P., VAN GINKEL A.R., KLATT M., RAUN W.R., STONE M.L. (2006):** Spectral Reflectance Indices as a Potential Indirect Selection Criteria for Wheat Yield under Irrigation. *Crop Science*, 46, 578-588
- CUBERT (2016):** UHD 185 - Easy and reliable imaging spectrometer for UAV. <www.cubert-gmbh.de/wp-content/uploads/UHD-185.pdf>
- CURRAN P.J. (1989):** Remote Sensing of Foliar Chemistry. *Remote Sensing of Environment*, 30, 271-278
- DASGUPTA S., QU J.J., HAO X., BHOI S. (2007):** Evaluating remotely sensed live fuel moisture estimations for fire behavior predictions in Georgia, USA. *Remote Sensing of Environment*, 108, 138-150
- EDMUND.OPTICS (2016a):** Hart beschichtete Bandpassfilter OD 4 25 nm.
<<http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/bandpass-filters/hard-coated-od4-25nm-bandpass-filters/3503/#page-2>>
- EDMUND.OPTICS (2016b):** Hart beschichtete Bandpassfilter OD 4 50 nm.
<<http://www.edmundoptics.de/optics/optical-filters/bandpass-filters/hard-coated-od4-50nm-bandpass-filters/3503/#page-2>>

- FLIR (2016):** The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals.
<<http://www.flir.eu/science/display/?id=69528>>.
- GAO B.-C. (1996):** NDWI - A Normalized Difference Water Comment for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266
- GEHRKE R., GREIWE A. (2013):** Multispectral image capturing with foveon sensors. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Rostock
- GENC L., INALPULAT M., KIZIL U., MIRIK M., SMITH S.E., MENDES M. (2013):** Determination of water stress with spectral reflectance on sweet corn (*Zea mays* L.) using classification tree (CT) analysis. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100, (1), 81-90
- GUTIERREZ M., REYNOLDS M.P., KLATT A.R. (2010):** Association of water spectral indices with plant and soil water relations in contrasting wheat genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 61, (12), 3291-3303
- HUETE A.R. (1988):** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, (3), 295-309
- JONES C.L., WECKLER P.R., MANESS N.O., STONE M.L., JAYASEKARA R. (2004):** Estimating Water Stress in Plants Using Hyperspectral Sensing. ASAE/CSAE Annual International Meeting. Ottawa, Ontario, Canada
- KOWA (2016a):** LM5JC1M. <www.kowa-europe.com/lenses/en/data/LM5JC1M.pdf>
- KOWA (2016b):** LM5LC10M. <www.kowa.eu/lenses/en/data/LM5JC10M.pdf>
- MINNOWBOARD (2016):** MinnowBoard MAX. <http://wiki.minnowboard.org/MinnowBoard_MAX>
- MONTEIRO P.F.C., ANGULO FILHO R., XAVIER A.C., MONTEIRO R.O.C. (2012):** Assessing biophysical variable parameters of bean crop with hyperspectral measurements. *Scientia Agricola*, 69, 87-94
- NASA (2016):** Specifications. <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>
- NEELAND H., KRAFT M. (2013):** Aufbau und Messtechnik des ThünoCopters zur berührungslosen Inspektion von Pflanzenbeständen: Erste Messungen mit einem Low-Cost Computer-Bild-Analyse-System. *Bornimer Agrartechn. Ber.*, 81, (303)
- NLSTBV (2016):** Unbemannte Luftfahrtsysteme.
<http://www.strassenbau.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=33054&article_id=114884&psmand=135>
- OLLINGER S.V. (2011):** Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytol*, 189, (2), 375-394
- ONSEMI (2016):** 1/3-Inch Wide-VGA CMOS Digital Image Sensor
<www.onsemi.com/pub/Collateral/MT9V024-D.PDF>
- PEÑUELAS J., ISLA R., FILELLA I., ARAUS J.L. (1997a):** Visible and Near-Infrared Reflectance Assessment of Salinity Effects on Barley. *Crop Sci.*, 37, (1), 198-202
- PEÑUELAS J., PIÑOL J., OGAYA R., FILELLA I. (1997b):** Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18, (13), 2869-2875
- PRASHAR A., JONES H. (2014):** Infra-Red Thermography as a High-Throughput Tool for Field Phenotyping. *Agronomy*, 4, (3), 397-417
- RAHMAN M.M., LAMB D.W., STANLEY J.N. (2015):** The impact of solar illumination angle when using active optical sensing of NDVI to infer fAPAR in a pasture canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 39-43

- REICHARDT M. (2010):** Precision Farming in der deutschen Landwirtschaft - eine GIS-gestützte Analyse. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum
- RIKOLA (2016):** VIS-VNIR Snapshot Hyperspectral Camera for UAVs.
<www.rikola.fi/Hyperspectral_camera.pdf>
- ROUSE J.W. (1974):** Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (greenwave Effect) of Natural Vegetation. Texas A & M University, Remote Sensing Center
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W. (1974):** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symposium, 309-317
- SIMS D.A., GAMON J.A. (2003):** Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84, (4), 526-537
- SITTE P., WEILER E.W., KADEREIT J.W., BRESINSKY A., KÖRNER C. (2002):** Strasburger - Lehrbuch der Botanik. Springer Spektrum, 35. Auflage
- SPECTROGON (2016):** Filter CWL shift as function of AOI and temperature.
<<http://www.spectrogon.com/product-services/optical-filters/filter-cwl-shift-as-function-of-aoi-and-temperature>>
- USGS (2016):** What are the band designations for the Landsat satellites?
<http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php>
- VADIVAMBAL R., JAYAS D.S. (2010):** Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry-A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 4, (2), 186-199
- VISION.DOKTOR (2015):** Interferenzfilter. <<http://www.vision-doctor.de/interferenz-filter.html>>
- VRMAGIC (2016):** VRmagic Imaging Solutions.
<https://www.vrmagic.com/fileadmin/downloads/imaging/Brochures/120516_imaging_katalog_2012_de_web_sp.pdf>
- XENICS (2016a):** Bobcat-640-GigE: High resolution small form factor InGaAs camera.
<www.xenics.com/sites/default/files/leaflets/xb-040_06_bobcat-640-gige_industrial_lowres.pdf>
- XENICS (2016b):** Gobi-640-GigE: High resolution uncooled thermal GigE Vision camera.
<www.xenics.com/sites/default/files/leaflets/xb-061_06_gobi-640-gige_rd_highres.pdf>
- XENICS (2016c):** Lens selector guide.
<[http://www.xenics.com/en/products/lenses?f\[0\]=field_focal_length_term%3A676](http://www.xenics.com/en/products/lenses?f[0]=field_focal_length_term%3A676)>
- ZARCO-TEJADA P.J., GONZÁLEZ-DUGO V., BERNI J.A.J. (2012):** Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322-337
- ZARCO-TEJADA P.J., RUEDA C.A., USTIN S.L. (2003):** Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 85, 109-124

Pod-Copter: Ein kabelgebundenes und autonom fliegendes UAV zum Einsatz als zeitlich unbegrenzte Trägerplattform in der Landwirtschaft

Pod-Copter: a tethered, autonomous UAV with unlimited flight time as a carrier platform for use in agriculture



Christian Gieselmann

*Insensiv GmbH, Heidsieker Heide 114, 33739 Bielefeld
E-Mail: c.gieselmann@insensiv.de*

Zusammenfassung: Unmanned aerial vehicles (UAVs) bieten durch sich immer weiter und rasant entwickelnde Technik vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Bereich landwirtschaftlicher Anwendungen. Jedoch bringt deren Einsatz auch einige Herausforderungen mit sich, welche für den Anwender zu lösen sind.

Der Pod-Copter als kabelgebundenes UAV wird über die Verbindungsleitung mit Strom versorgt, dies ermöglicht einen Dauereinsatz über den ganzen Arbeitstag. Eine optische Lagesteuerung ermöglicht eine autonome Steuerung des Copters, nur der Start- und Landevorgang wird durch den Bediener eingeleitet. Im Betrieb hält der Copter seine relative Position zum Fahrzeug, die je nach Aufgabenstellung vor oder hinter und in variabler Höhe liegen kann.

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 kann der Pod-Copter unter anderem zur Erfassung bei Kraut und Wildtieren genutzt werden oder um eine Analyse des Nährstoffgehalts des Bodens durchzuführen. Darüber hinaus können beispielsweise Bestandskanten von Ackerflächen erkannt oder Bewuchs Zustandserkennung vor dem Fahrzeug in Echtzeit (Online) ausgewertet und direkt mit gezielter Steuerung z.B. des Sprühgerätes reagiert werden.

In Bezug auf rechtliche Gegebenheiten in der Luftfahrt und Handhabung ergeben sich ebenfalls Vorteile durch die Kabelbindung des Fluggerätes. 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 erfüllt. Zudem erleichtert die automatische Positionierung und Steuerung durch die eingebaute Sensorik die Handhabung, da ein Betrieb ohne spezielles Personal, ae-

ronautische Kenntnisse oder die Notwendigkeit von umfangreichen Schulungen möglich ist.

Einmal angeschlossen begleitet der Copter das Fahrzeug den ganzen Arbeitstag, es ist kein weiteres Eingreifen seitens des Fahrers nötig, um den Pod-Copter in der Luft zu halten.

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 Wissensstand, den man zurzeit zum Copter hat lautet wie folgt: sie sind GPS gesteuert, manuell, Sensoren sind auf Copter vorhanden, es findet eine Offline Auswertung statt.

Unser Ziel ist eine permanente Haltung einer vorgegebenen Position. Die Sensorplattform, die mit verschiedenen Sensoren besetzt ist, soll das Areal dauerhaft autonom und in Echtzeit analysieren.

2 Material und Methoden

Probenmaterial, Versuchsdurchführung und Methoden

Da alle vorhandenen Copter auf dem Markt nicht für den gedachten Anwendungsfall konzipiert sind, haben wir uns entschlossen, alle notwendigen Teile neu zu konzipieren, bzw. eine komplette Neukonstruktion durchzuführen.

Hierzu stand als erstes die Überlegung an, welche Bauform verwendet wird. Bei einem Quadcopter hätten wir leistungsstärkere Motoren auswählen können, die stärkere Lager hätten und somit eine längere Lebenszeit ermöglichen.

Bei einem Hexacopter könnten wir jedoch einen kleineren Motor verwenden. Diese besitzen in der Regel aber ein schwächeres Lager und unterliegen somit einem verstärkten Verschleiß.

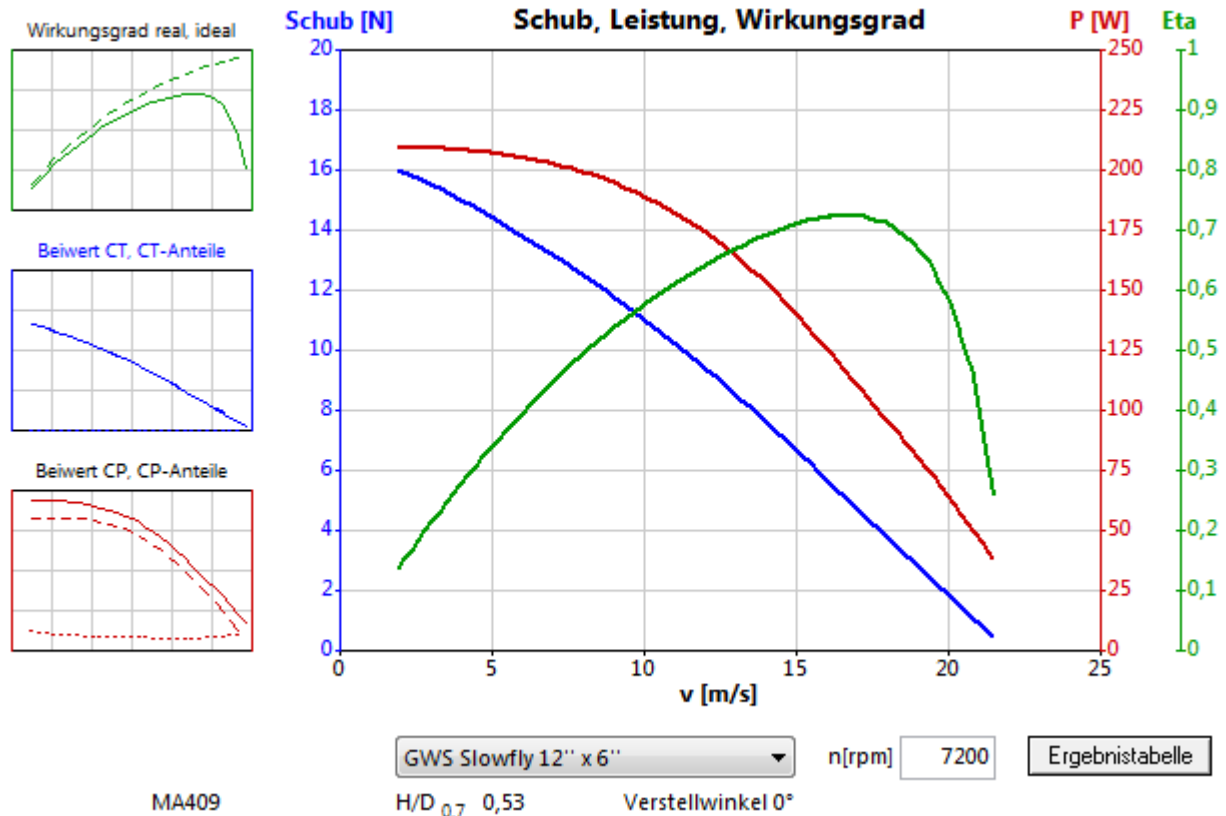


Abbildung 1: Leistungskurve

Wir haben uns für die Konstruktion eines Hexacopters entschieden, da wir hier beim Ausfall eines Motors den Copter noch sicher betreiben können, ohne einen direkten Absturz zu erleiden.

Die Grundkörperkonstruktion erfolgt auf Basis eines GFK Körpers, da EPP bei der Konstruktion eines solch großen Copters eine Instabilität des Torsos nach sich ziehen könnte.



Abbildung 2: Konstruktion Hexacopter mit seitlichem Propellerschutz.
Konstruktionsmaterial GFK.

Die Motoren sind auf dem Markt für diese Anwendung Dauerbetrieb und regenfest nicht zu erhalten. Wir haben einen Dauerteststand eingerichtet, wo ein Motor mit Propeller Leistungsstufen von 50 – 100% durchfährt und dann zusätzlich um +/- 15 Grad in der Achse geschwenkt wird, um Lastwechsel zu simulieren.

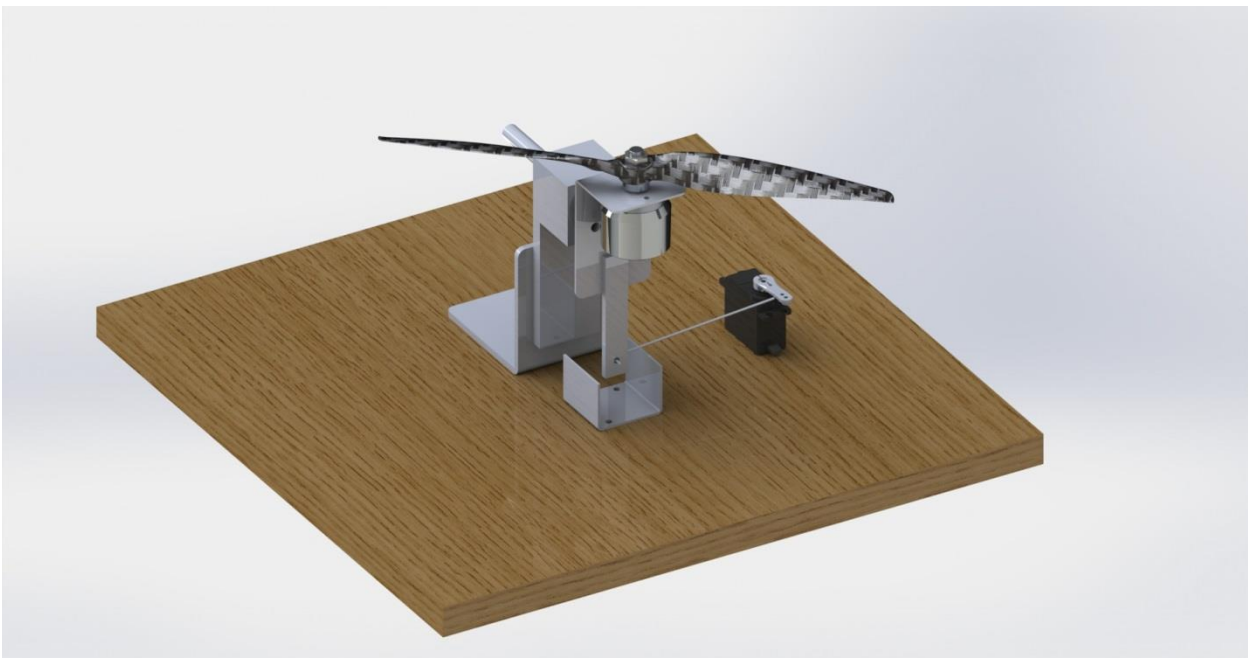


Abbildung 3: Motorteststand mit Achsschwenkung und Lastwechsel Simulation.

Nach 200 Betriebsstunden läuft der Standard Prämiemotor immer noch, lässt aber in der Schubleistung deutlich nach und wird merklich lauter.

Für unseren Einsatz ist ein Motor mit verstärkten Lagern und einer Regenschutzkappe in der Entwicklung. Wir benötigen eine Laufzeit von min. 2.000 Stunden, selbst dann ist der Motor Verschleißteil und muss ca. alle 4 Jahre getauscht werden.

Die Energieübertragung ist eine besondere Herausforderung, da bei längerer Kabellänge das Gewicht größer wird und umso mehr Gewicht der Copter tragen muss, umso mehr Leistung wird benötigt.

Wir haben Tests gefahren mit Standard Kupferkabel 2-adrig isoliert - 1,5 qmm und 2,5 qmm. Der entsprechende Spannungsabfall am Kabel wurde kompensiert durch eine höhere Spannung der Spannungsversorgung der Bodenstation.

Während das 2,5 qmm Kabel bei 15 m Länge praktisch die geplante Zuladung in Anspruch nimmt, wird dieses nur handwarm. Im Gegenzug ist das 1,5 qmm Kabel in unserer Gesamtgewichtsbilanz im Rahmen, allerdings wird dies so heiß, dass eine Verbrennungsgefahr besteht. Ein Überspannungsproblem besteht ebenfalls, da bei deutlicher Leistungsabnahme vom Copter im Sinkflug der Spannungsabfall am Kabel deshalb auch sinkt und die Elektronik am Copter zerstört werden kann.

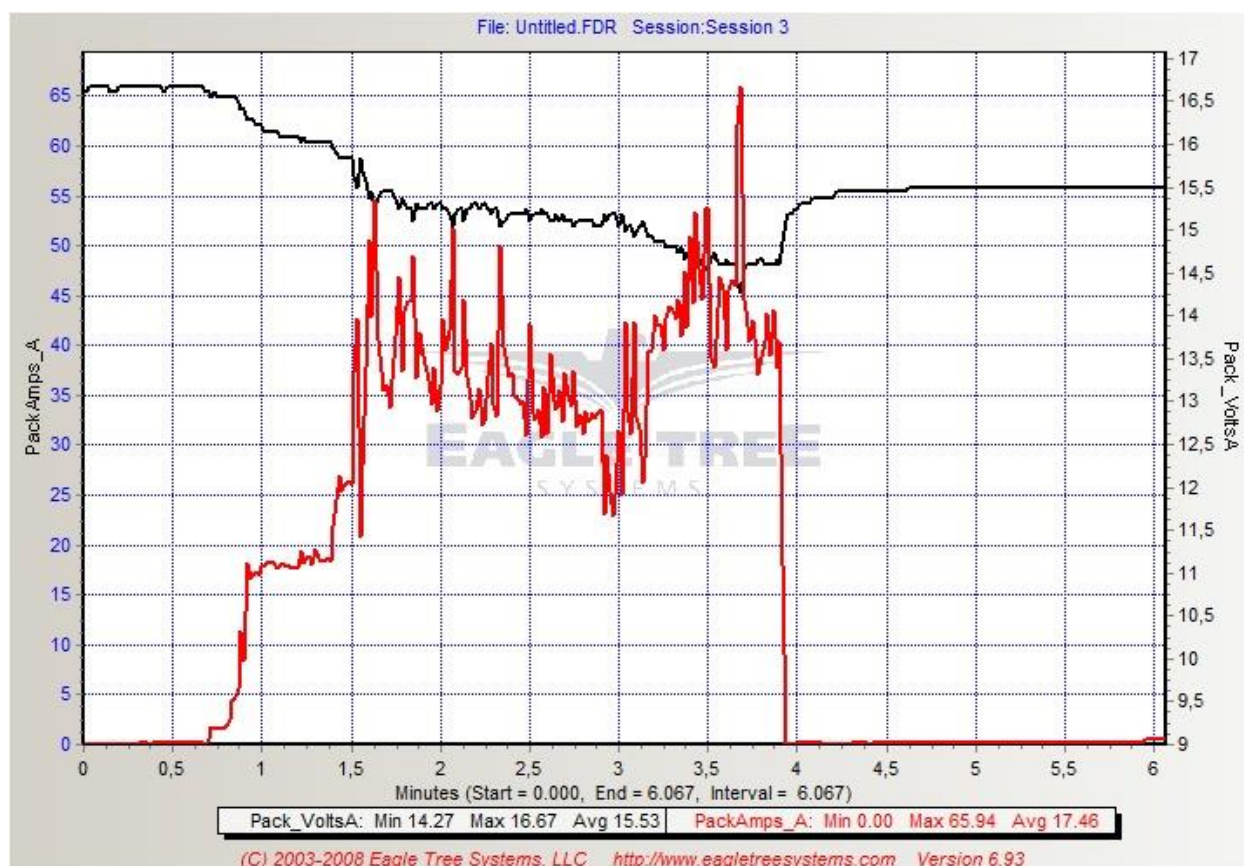


Abbildung 4: Strom- und Spannungsmessung eines Flugversuches mit Akku am Board.

Die Energieübertragung mittels DC/DC Wandler ist deshalb fester Bestandteil des Entwicklungsprojektes. Wir setzen einen Spannungswandler ein, der eine Spannung von bis zu 400 VDC am Copter auf die benötigte Boardspannung von 15 VDC für die Moto-

ren herunter transformiert. Die auf dem Markt erhältlichen Module sind soweit für unsere ersten Flugversuche tauglich, aber in der Serie werden wir eine Eigenentwicklung aus Optimierungsgründen einbauen.

Die Landeplattform muss deshalb auch die geforderte Spannung von 400 VDC zur Verfügung stellen, damit das System betrieben werden kann.

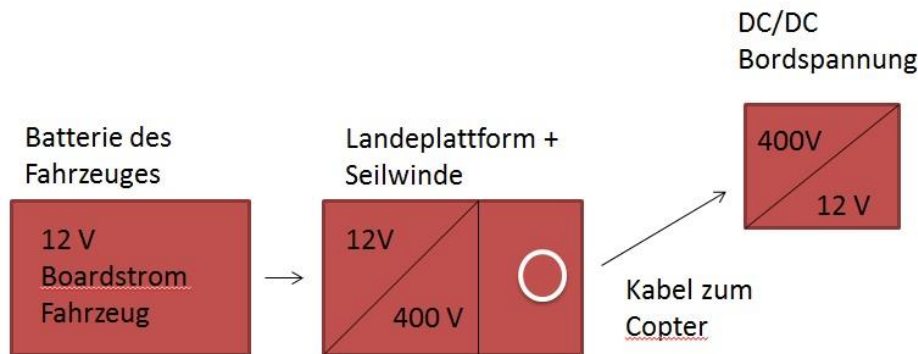


Abbildung 5: Schemata Zeichnung der Spannungstransformation vom Fahrzeug zum Copter.

Das Kabel kann somit mit einem deutlich kleineren Querschnitt und somit mit einem deutlich kaum noch merklichen Gewicht eingesetzt werden. Als weiteren Optimierungsschritt entwickeln wir ein Aluminiumkabel, das einen besseren Leitwert im Verhältnis zum Kupferkabel bei gleichem Gewicht hat. Hierdurch wollen wir längere Reichweiten (Kabellängen) erzielen.

Damit der Copter in der vorgegebenen Position zum fahrenden Fahrzeug verbleibt, muss dieser permanent hochpräzise die Position halten.

Per GPS ist dies theoretisch möglich, aber bei einer Abweichung von einigen dm befürchten wir eine aufklingende Schwingung in der Nachregelung, so dass wir keine gerade Spurführung erreichen. Besonders in der Höhenmessung haben wir unsere Bedenken.

Wir haben uns für ein kamerabasiertes Messverfahren entschieden, bei dem eine Kamera die Landeplattform am Fahrzeug permanent im Blickfeld hat, dessen Markierungen und mittels eines Modells die Raumkoordinaten des Copters zu der Landeplattform in Echtzeit ermittelt. Die ermittelte Lageerkennung durch die Kamera wirkt auf die Steuerung des Copters direkt ein.

Der ursprüngliche Ansatz, die Landeplattform mit passiven Symbolen und Kreisen auszurüsten, wurde dahin erweitert, dass aktive LEDs eingesetzt werden.

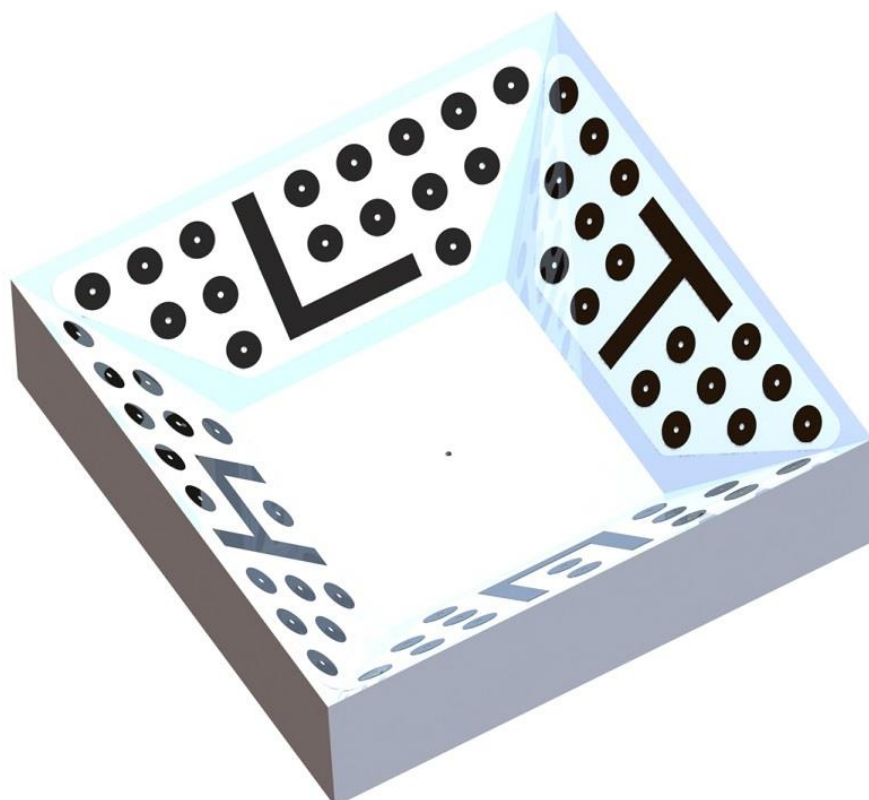


Abbildung 6: Landeplattform perspektivische Ansicht. Ursprungsmodell zur Koordinatenbestimmung.

Dies ermöglicht auch bei Verschmutzungen und im Nachtbetrieb eine bessere Lageerkennung.

Zum Automatikbetrieb gehört das selbstständige Starten und Landen des Copters.

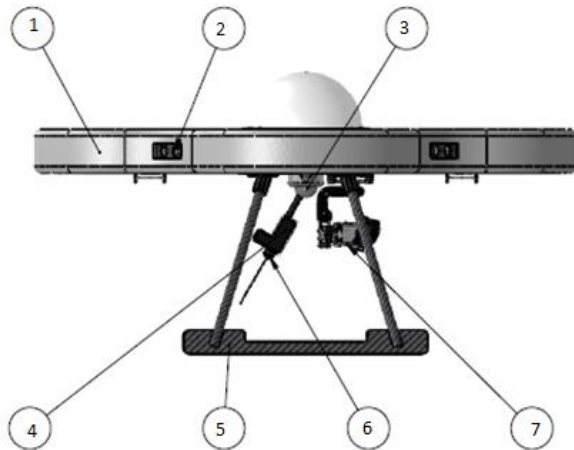
Eine integrierte Elektrowinch mit Kraftsensor am Kabel ermöglicht dies in Kombination mit der kamerabasierten Lageerkennung. Bei der Elektrowinch ist dabei drauf zu achten, dass die Kabel sauber geführt werden und diese beim Auf- und Abwickeln nicht verknoten können.

Die Landeplattform, in der sich die Elektrowinch und Energieübertragung befindet, muss transportabel sein, um sie zumindest mit 2 Personen am Fahrzeug befestigen zu können. Die ursprüngliche Idee, diese auf dem Dach zu montieren, können wir verwerfen, da die Straßenverkehrsordnung keine Aufbauten über 4 m Höhe zulässt.

Eine schnelle Montage am Vorderlenker oder an einem vorgesehenen Platz, wo Halterungen angebracht sind, ist deshalb notwendig.

Das triviale Thema Montagefreundlichkeit kann marktentscheidend sein, da die Landevorrichtung für verschiedene Fahrzeuge wie Traktoren, Mähdrescher, selbstfahrende Erntehäcksler u.a. wechselbar sein soll, um eine große Möglichkeit an Einsatzzwecken zu gewährleisten.

Der Copter ist mit dem Kabel über eine Kupplung verbunden. Diese Kupplung kann im Bedarfsfall per Steuerung im Flug getrennt werden, also im Fall einer andauernden Stromunterbrechung von seitens der Landeplattform. In diesem Fall kann der Copter sicher selbstständig notlanden.



Pos. Nr.:	Benennung
1	Grundkörper
2	Kollisionssensor
3	Kugelgelenk
4	Lagekamera mit Kupplung
5	Fahrwerks-Schiene
6	Lagekamera mit Kupplung
7	<u>Gimbal</u>

Abbildung 7: Funktionsteile des Copters

Damit das selbstständige Notlandeszenario funktioniert, ist ein kleiner Reserve-Akku an dem Copter untergebracht.

Weiterhin hat die Kupplung einen mechanischen Schutz, wenn die Zugkräfte an der Kupplung über den eingestellten Wert gehen, dann öffnet die Steckverbindung von alleine. Dies erfolgt im Fall, dass der Copter irgendwo hängen bleibt, also zum Bsp. an Ästen, damit es keine größeren Beschädigungen am Copter gibt.

Die Sensoren sollen diesen Fall vermeiden. Hier sind wir in der Testphase, welche Sensoren wie weit im Vorfeld kleine Details erkennen. Ultraschallsensoren funktionieren nur bis zu einer gewissen Geschwindigkeit. Radarsensoren müssen gerichtet werden und sollen trotzdem noch Details wie Überlandleitungen erkennen.

Diese Entwicklungsschritte sind bisher nur dafür da, um den Copter in der Position zum fahrenden Fahrzeug zu halten.

Damit er seine eigentliche Aufgabenstellung als Sensorplattform durchführen kann, benötigt der Copter einen Gimbal. Diese Vorrichtung ermöglicht die lagegetreue Ausrichtung der Sensorik in der vorgegebenen Position, zum Bsp. direkt nach unten im 90 Grad Winkel zur Arbeitsebene. Hierzu muss der Gimbal in 2 Achsen permanent nachgeregelt werden, um das Wackeln des Copters auszugleichen.

Eine universelle Trägerplatte soll es ermöglichen, verschiedene Sensoren an dem Gimbal zu befestigen. Dies soll eine schnelle Montage ermöglichen und die Spannungsversorgung für den Sensor ebenfalls mit integriert haben.

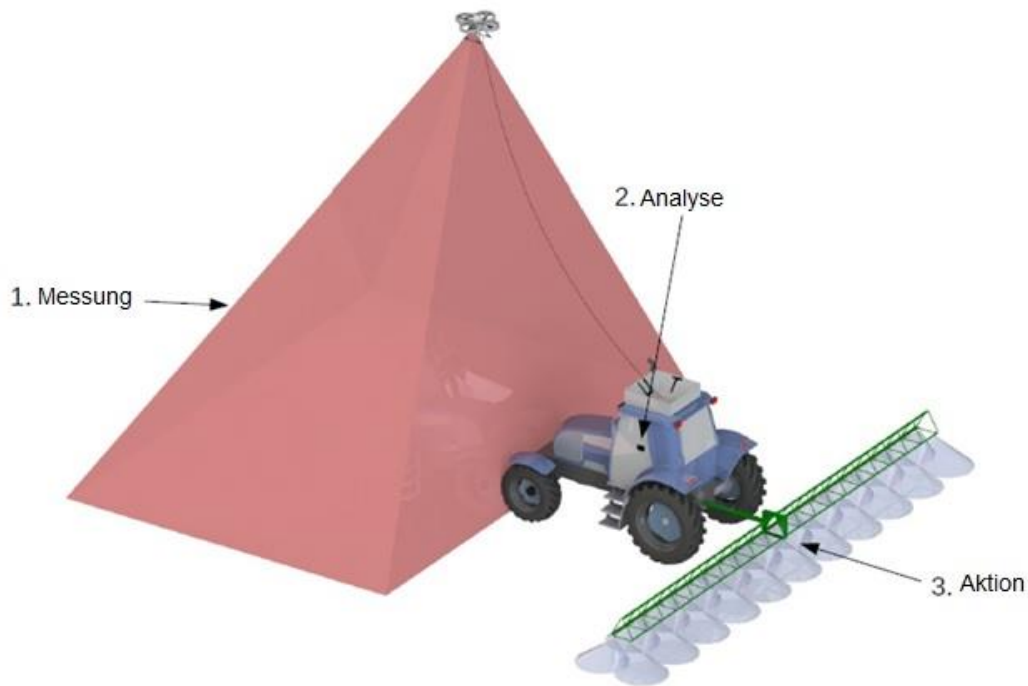


Abbildung 8: Beispiel Anwendung

Als Sensoren kommen unter anderem

RGB Kameras

IR Kamera

Spektralkameras

Thermografiekameras

Stereokameras

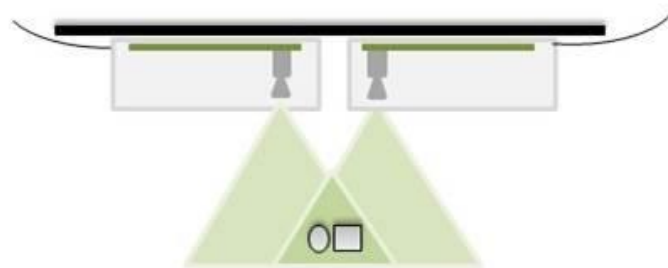


Abbildung 9: Schematazeichnung einer Stereoptik

oder sonstige Sensoren evtl. auch in Kombination in Frage.

Es wird ein Auswerterechner benötigt, der die Analyse der Sensordaten aufarbeitet und diese auf das Bedienterminal im Fahrerhaus per WLAN sendet.

Ein direktes Senden der unbearbeiteten Bild per WLAN kann zu Problemen führen, da unter Umständen die Bandbreite nicht ausreicht und bei Störungen im Funk das gesamte System nicht mehr funktioniert.

Ein Aufmodulieren der Datenübertragung auf die Spannungsversorgungsleitung halten wir auch nicht für sicher, da die Transformationen trotz der hohen Spannungen mit sehr hohen Frequenzen arbeiten.

3 Diskussion und Schlussfolgerung

Bei der Umsetzung der Entwicklungsschritte wurden so weit wie möglich alle Entwicklungsschritte parallelisiert.

Einige Teilschritte wurden vorgezogen, damit wir schrittweise den Copter an die Fertigstellung bringen.

Als Erstes realisieren wir die Energieübertragung mittels Kabel und Spannungstransformation. Die Positionsbestimmung des Copters mittels Kamera in Kombination mit den Markierungen auf der Landeplattform erfolgt anschließend. Diese Signale werden für die Programmierung der Steuerung benötigt, um die ersten Flugversuche auf dem Feld durchzuführen.

Die peripheren Baugruppen wie Elektrowinch, Kollisionsschutz, Gimbal, Notakku, Energiekopplung, Sensorik, Bedienterminal werden dann schrittweise umgesetzt.

Schnelle Analyse ohne Programmieren – Hochdurchsatzana- lyse von Pflanzendaten mit der LemnaTec Bildverarbeitung

Stop coding – Start analysing ***High throughput plant analysis with LemnaTec Image Pro- cessing***

Stefan Paulus, Tino Dornbusch, Marcus Jansen

LemnaTec GmbH, Pascalstr. 59, 52076 Aachen,
E-Mail: stefan.paulus@lemnatec.de

Zusammenfassung: Für die Phänotypisierung von Pflanzen werden große Mengen an Daten aufgenommen. Zur Analyse der Pflanzeigenschaften bedarf es einer angepassten Analyse, sowie Sachkenntnis und Erfahrung auf Seiten der Anwender. Automatisierte Werkzeuge, die stets nur einen Teil der Auswertungsprozedur abbilden, stehen für verschiedene Programmiersprachen zur Verfügung. Mit der Bildverarbeitungssoftware *LemnaGrid* von LemnaTec hat sich in den vergangenen Jahren ein Werkzeug zur automatisierten Analyse großer Bilddatenmengen etabliert. Dieses Werkzeug integriert eine Vielzahl von Algorithmen aus der Bildverarbeitung, z.B. Kantendetektoren und Gaussfilter; es ermöglicht den angepassten Schwellwerteinsatz, die Segmentierung einzelner Pflanzenteile und den Einsatz maschineller Lernmethoden. Einzelbausteine können auf einer grafischen Benutzeroberfläche verbunden werden und erlauben den Aufbau komplexer und automatisierbarer Auswertungsprozeduren für große Bilddaten-sätze.

Anwendungen wie die geometrische Parametrisierung der Gesamtpflanze, die Klassifikation der Ähren auf Bildern aus Getreidebestandsaufnahmen mit RGB Kameras oder 3D Laserscannern, sowie die Segmentierung der Blätter unter Nutzung von hyperspektralen Aufnahmen sind im Hochdurchsatz möglich. Einmal erarbeitete Verarbeitungsprozeduren können leicht für die Anwendungen bei unterschiedlichen Pflanzenarten angepasst werden.

Zwei Anwendungsszenarien dieser Software werden in dieser Publikation genauer beleuchtet. Eine automatisiert ablaufende Auswertepipeline wird für die Extraktion geometrischer Parameter aus RGB Pflanzenfotos gezeigt, die im Gewächshaus aufgenommen wurden. Grundlage hierfür sind Daten aus automatisiert aufgenommenen Gewächshausmesskammern mit Fließbandsystem. In einer zweiten Anwendung werden hyperspektrale Eigenschaften zur Bestimmung des Stickstoffgehaltes auf Feldebene genutzt, die von einer krangestützten Messplattform aufgenommen wurden.

Die Bildanalysesoftware *LemnaGrid* ist ein professionelles Tool, das es ermöglicht, Algorithmen der Bildverarbeitung graphisch zu verknüpfen und für unterschiedlichste Anwendungen verschiedener Pflanzenarten und -sorten zu nutzen. Dabei können unterschiedlichen Sensoren aus dem RGB-, 3D-, Hyperspektral- oder Fluoreszenzbereich auf unterschiedlichen Skalenebenen, von der Mikroskopie- bis zur Feldebene, eingesetzt werden.

Deskriptoren: Phänotypisierung, Bildverarbeitung, automatische Analyse, Hochdurchsatz

Abstract: *Phenotyping of plants comes along with the acquisition of huge sets of 2D images. A suitable and adapted analysis is essential to analyze plant properties, as well as a good education for the customer and huge experience. Automated tools that mostly cover a small part of the analysis pipeline using different programming languages. During the last years the processing tool LemnaGrid from the LemnaTec Company has been established that provides the automated analysis of huge numbers of images. This tool provides different algorithms from computer vision like simple edge detectors, adapted thresholding, segmentation of single plant organs and the use of machine learning methods. Single modules can be connected using a graphical user interface and enable building of a complex analysis pipeline for the automated analysis of huge image datasets.*

Applications like the geometric parameterization of the complete plant, the classification of ears from images coming from cereal fields using RGB cameras or 3D laser scanners, as well as the segmentation of leaves by using hyperspectral images are possible using high throughput image analysis. Established analysis pipelines can easily be adapted for applications using other plant species.

Two application scenarios will introduced within this publications. A completely automated analysis pipeline is shown for the extraction of geometrical parameters using RGB images coming from a greenhouse imaging booth combined with a conveyor system. A second application shows the use of hyperspectral properties for the identification of different nitrogen levels on field scale, imaged by a crane-based measuring platform.

The analysis tool LemnaGrid is a professional tool that enables the graphical combination of algorithms from computer vision and their use for different applications and plant species. Various sensor data coming from RGB-, 3D-, hyperspectral- or fluorescence cameras on different scale – from microscopic to the field scale – can be processed.

Keywords: *phenotyping, image processing, automated analysis, high throughput*

1 Datenanalyse und Definition des phenotyping bottleneck

Zur Phänotypisierung werden Aufnahmesysteme in verschiedenen Größen verwendet, die die unterschiedlichsten Sensortechniken kombinieren, um ein möglichst vollständiges digitales Abbild der Pflanze aufzunehmen. Dabei kommen neben RGB Sensoren für das sichtbaren Licht auch IR/NIR (Infrarot/Nahinfrarot) Sensoren, Hyperspektralsensoren, sowie 3D Lasermesstechnik und Fluoreszenzsensoren zum Einsatz (FIORANI & SCHURR 2013, FURBANK & TESTER 2011, RAHAMAN *et al.* 2015). Ziel ist es, die Geometrie der Oberfläche (PAULUS *et al.* 2014), sowie die radiometrischen Eigenschaften der Pflanze (MAHLEIN *et al.* 2012) zu vermessen, um Aussagen über die Physiologie und äußere Beschaffenheit, insbesondere über die Größe, abzuleiten. Die nicht-invasive Sensortechnik ermöglicht wiederholte Messungen an individuellen Pflanzen, so dass die unterschiedlichen Messwerttypen jeweils in zeitlicher Abfolge zur Verfügung stehen. Damit können nicht nur statische Zustände, sondern vor allem auch dynamische Entwicklungen der Pflanzen ermittelt werden.

Die Firma LemnaTec ist Systemanbieter für Automatisierung im Bereich der biologischen Phänotypisierung, z.B. in Gewächshäusern. Dort werden mehrere hundert Pflanzen über Fließbandsysteme zwischen dem Gewächshaus und den einzelnen Sensormesskammern bewegt (BRIEN *et al.* 2013). Die Automatisierung der Messprozesse, Bewässerung, die ständige Überwachung der Pflanzenposition und die vollautomatisierte Auswertung der unterschiedlichen Sensordaten ist seit vielen Jahren eine Kernkompetenz von LemnaTec (NEILSON *et al.* 2015). Außerdem bietet LemnaTec Laborgeräte an, die ebenfalls Sensormessungen an Pflanzen ermöglichen. Die Laborplattformen können mit oder ohne Automatisierungstechnik erstellt werden. Sie nutzen die gleichen Auswerteprinzipien wie die Gewächshausanlagen.

Um die Erkenntnisse aus Gewächshausversuchen auf Feldversuche zu übertragen, wurde ein neues Produkt, der *Scanalyzer Field*, konzipiert. Das erste System wurde 2015 am Forschungszentrum Rothamsted (Harpenden, UK) errichtet. Dabei wird eine Sensorbox mittels einer mobilen Kranplattform mit hoher Positioniergenauigkeit über das Feld bewegt. Die dabei aufgenommenen Sensordaten werden in einem gemeinsamen Koordinatensystem referenziert und in einer Datenbank mit spezifischen Metadaten (z.B. Ort, Zeit) gespeichert. Zusätzlich zu den bildgebenden Sensoren zeichnen Umweltsensoren Temperatur, CO² Gehalt, Windgeschwindigkeit und Einstrahlung auf.

Je nach verwendeter Sensorkombination müssen sehr große Datenmengen von der Sensorbox zum Datenbankserver transportiert und dort gespeichert werden. Bei einem typischen Einsatz mit einer hochauflösenden RGB-, IR/NIR-, Fluoreszenz-, Hyperspektralkamera und 3D Lasermesstechnik sind die Anforderungen an den Datendurchsatz, die Speicherung und vor allem an den Durchsatz der später durchzuführenden Analyse äußerst hoch (16 Gbyte bei Nutzung einer Hyperspektralkamera pro 3 m x 1 m Plot, (RAHAMAN *et al.* 2015)).

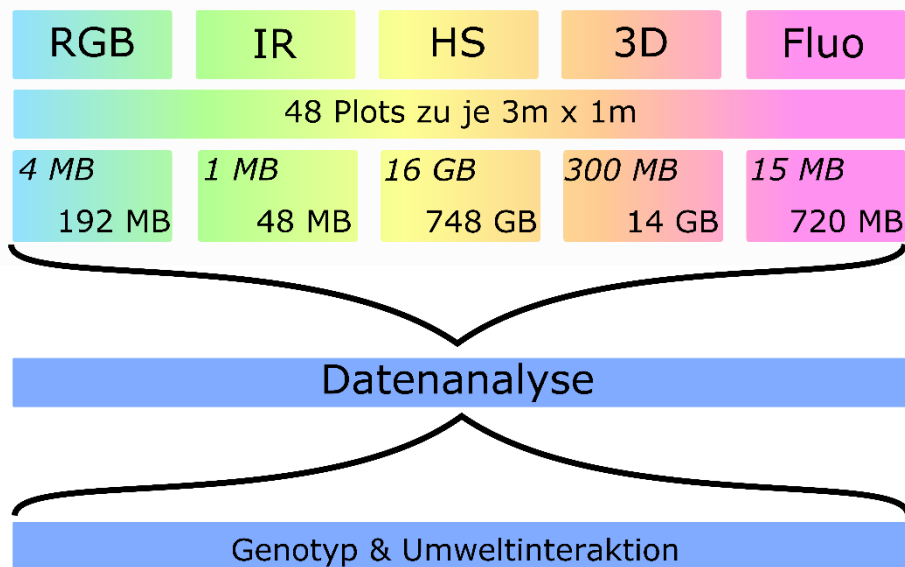


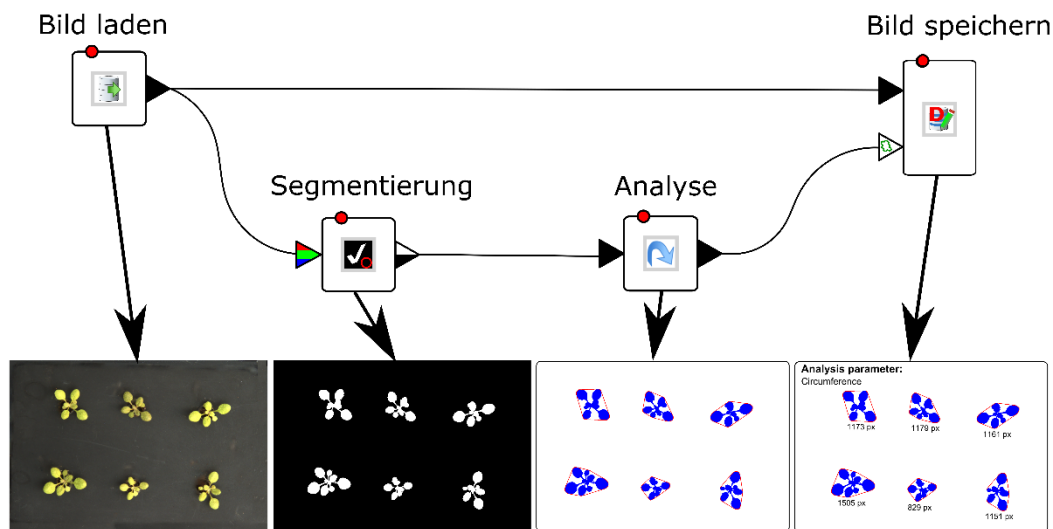
Abbildung 1: Um das Ziel der Aufschlüsselung der Genotyp/Pflanze-Interaktion zu erreichen müssen große Datenmengen, aufgenommen mit verschiedenen Sensoren, analysiert werden. Die dabei benutzten Sensoren liefern große Datenmengen von einigen Megabytes für RGB oder IR Sensoren bis hin zu mehreren Gigabytes großen Hyperspektraldaten.

In **Abbildung 1** ist schematisch dargestellt, welche Datenmengen von einer feldgestützten Sensorbox produziert werden. Dies unterstreicht den Stellenwert einer automatisierten Aufnahme und der daraus resultierenden Notwendigkeit einer strukturierten Speicherung von Daten und deren automatisierter Auswertung. Bei einer Feldgröße von 48 Plots zu je 3 m x 1 m fallen ca. 800 Gigabyte Sensordaten pro Feld an (Beispiel Rothamsted). Für die Zukunft muss, mit der Verfügbarkeit von Sensoren mit höherer Auflösung und stark steigender Tendenz, der Fokus in der Phänotypisierung auf der Entwicklung schneller und automatisierter Auswertelgorithmen liegen.

2 Einführung einer grafischen Programmierung zur automatisierten Analyse

Die Auswertung phänotypischer Daten erfolgt in der Praxis meist durch speziell auf die Sensordaten angepassten und vom Sensorhersteller entwickelten Programmen, oder mit auf das spezifische Problem angepassten, selbstprogrammierten Skripten. Dabei sind die Programme oft nicht sensorunabhängig zu nutzen oder auf einzelne Anwendungen spezialisiert. Grafische Programmierung bietet hier eine programmiersprachenunabhängige und intuitive Möglichkeit, die einzelnen Bausteine einer Auswertekette zu kombinieren und an ein bestimmtes Szenario anzupassen. Somit können Auswertepipelines für die Extraktion von Parametern z.B. aus Weizenexperimenten auf Experimente mit ähnlichen Pflanzen wie Gerste übertragen werden. Bei phänologisch weniger ähnlichen Pflanzen wie Mais sind eventuell Anpassungen nötig, welche bei noch unähnlicheren Pflanzen wie Raps umfangreicher werden können. Hierbei beschränkt sich die

Anpassung nur auf die Parametereinstellung der einzelnen Bausteine, so dass eine programmiersprachenunabhängige Kapselung der Methode erfolgt.



Arabidopsis Auswerteprozess

Abbildung 2: Verarbeitungsprozedur zur Analyse von Arabidopsispflanzen. Die Einzelschritte (Bausteine) umfassen Bild laden, Vordergrund/Hintergrundsegmentierung, Analyse der phänotypischen Parameter und Analysedaten/Bild speichern. Dabei werden die einzelnen Bausteine grafisch miteinander verbunden. Der Nutzer kann anhand weniger Parameter das Ergebnis beeinflussen. Die Analyse läuft automatisiert und ohne Programmierkenntnisse des Nutzers ab.

In **Abbildung 2** ist die automatisierte Auswertungsprozedur für die Berechnung phänotypischer Kenngrößen (Beispiel konvexe Hülle) von RGB Aufnahmen von Arabidopsis gezeigt. Die einzelnen Bausteine der Auswertung werden grafisch zusammengefügt und beinhalten die notwendigen Parameter für die Berechnungsschritte. Schrittweise werden dabei die Pflanzen vom Hintergrund getrennt (segmentiert), in einzelne Objekte zerlegt und deren Phänotypen berechnet.

Nach der Datenakquise wird vom Nutzer einmal exemplarisch für einen archetypischen Datensatz eine Auswertungsprozedur erstellt. Diese bildet die einzelnen Schritte der Analyse ab und berechnet Parameter wie z.B. Höhe, Breite, konvexe Hülle, Form und Biomasse. Diese Prozedur wird dann für alle folgend aufgenommenen Datensätze dieses Experimentes angewendet, so dass alle Verarbeitungsschritte einheitlich und vergleichbar sind. Einmal angelegte Auswertungen können gespeichert und mit anderen Nutzern geteilt werden, so dass Auswertungen unterschiedlicher Anwender und Experimente weltweit und unabhängig verglichen werden.

Im Folgenden wird dieses grafische Auswertesystem auf Beispieldatensätze aus dem Gewächshaus (*Scanalyzer 3D*) und dem neuen Feldsystem (*Scanalyzer Field*) angewandt um Wachstumskurven und Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Karten des Feldes zu erstellen.

3 Anwendungsbeispiel auf RGB Daten aus dem Gewächshaus

Das Beispiel hier zeigt exemplarisch zwei Gruppen von Tomatenpflanzen (30 Pflanzen je Gruppe), die nach zwei Wochen Wachstum unter gleichen Bedingungen, mit unterschiedlichen täglichen Wassermengen (400 und 600 ml pro Tag) bewässert wurden. Wie in **Abbildung 3** zu erkennen ist, führt die erhöhte Gabe von Wasser auch zu einem höheren Wachstum über 35 Tage.

Für die Auswertung von RGB Daten kommt eine Kombination verschiedener Bildverarbeitungsroutinen zum Einsatz. Neben der Vordergrund-/Hintergrundtrennung werden Filter und binäre Bildmasken verwendet um die Pflanze einwandfrei vom Hintergrund zu separieren und deren Größe zu berechnen. Dabei wird die Pflanzengröße (Biomasse) aus der Anzahl der Pixel abgeleitet. Zusätzlich lässt sich der Zustand der Pflanze auch durch eine Farbklassifizierung bestimmen, bei der hier grün (gesund) von gelb (chlorotisch) unterschieden wird. Der Unterschied ist in **Abbildung 4** sichtbar. Während die Fokussierung auf grüne Pixel die gelben Pixel ausspart und die Größe im Vergleich zur Nutzung aller Pflanzenpixel unterschätzt, lässt sich das Ergebnis nutzen um eine Aussage über den physiologischen Zustand der Pflanze abzuleiten.

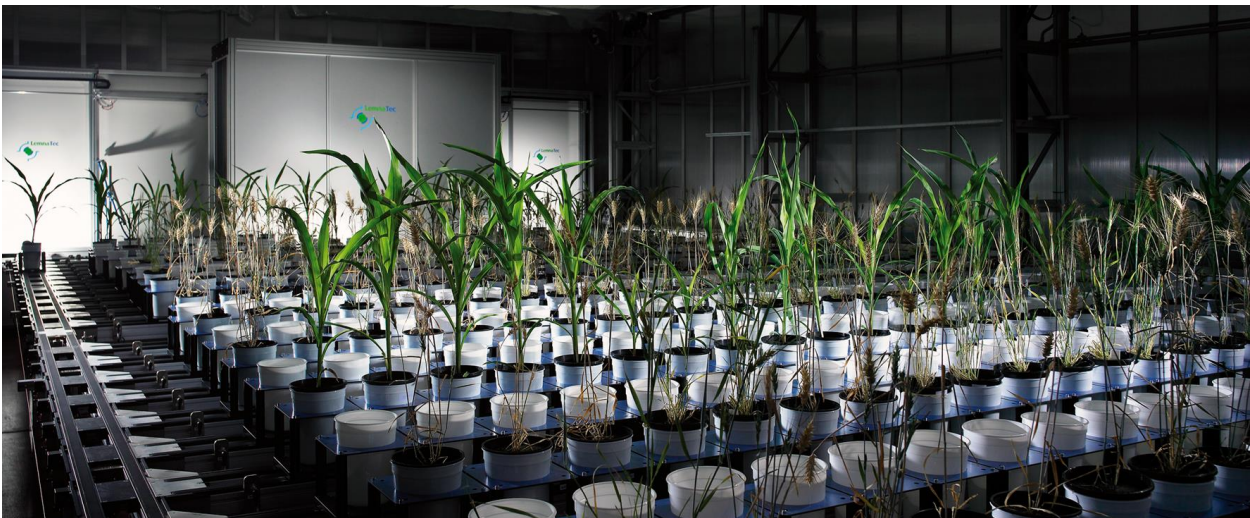


Abbildung 3: Speicherstation eines Gewächshausfließbandsystems. Zu sehen sind 16 Speicherbänder (rechte Seite), sowie das Transportband (linke Seite) das die Pflanzen zu den Messkammern (Hintergrund) fährt. Dort werden die Pflanzen mit verschiedenen Sensoren vermessen.

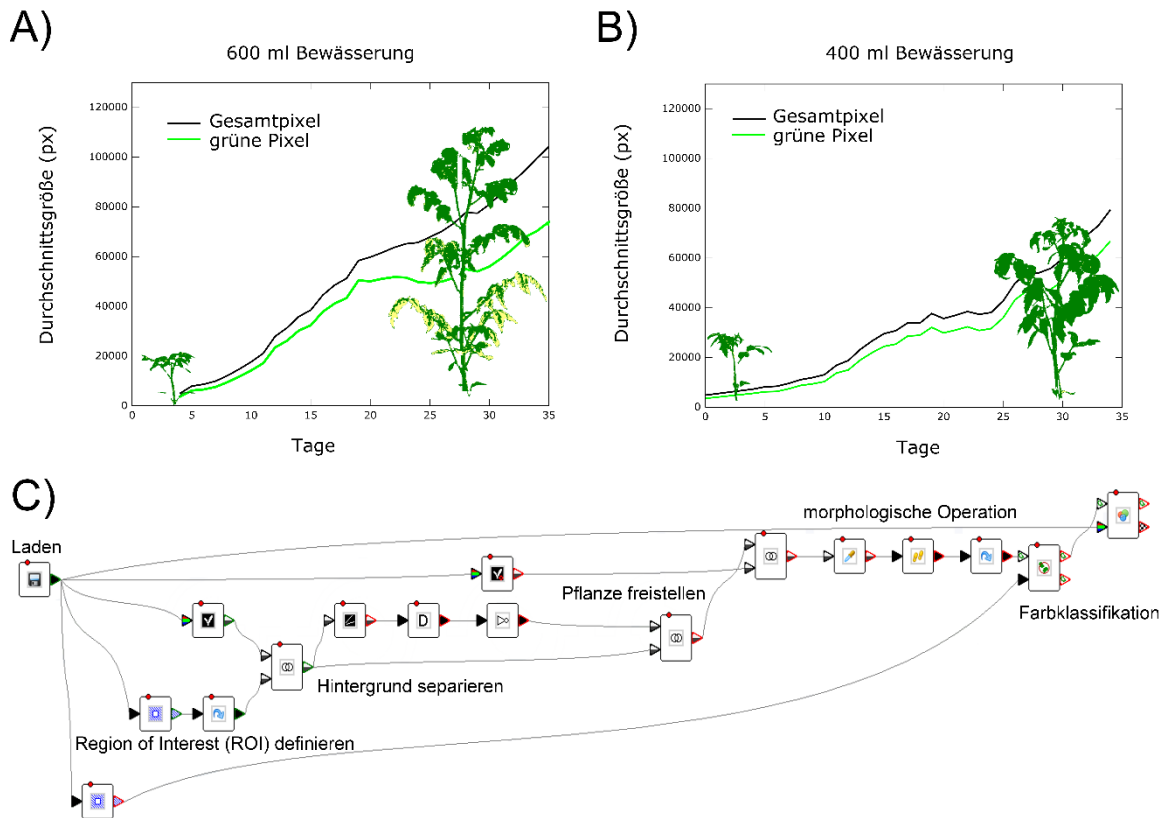


Abbildung 4: Durch tägliches Messen kann die morphologische Entwicklung der Pflanze beobachtet werden. Der Versuch zeigt das Wachstum zweier Pflanzengruppen (30 Pflanzen je Gruppe), die nach 14 Tagen für 35 Tage mit unterschiedlichen Wassermengen (A 600 ml & B 400 ml) bewässert wurden. Dabei wird die Anzahl der Pflanzenpixel beschrieben. Die Anzahl der Gesamtpixel, sowie die Anzahl der als grün klassifizierten Pixel zeigen unterschiedliche Wachstumskurven für beide Behandlungen. Der Unterschied zwischen der Anzahl der Gesamtpixel und der Anzahl der grünen Pixel gibt Auskunft über den physiologischen Zustand der Pflanze. Für die Auswertung wurde eine Kombination verschiedener Bildverarbeitungsalgorithmen mit LemnaGrid verwendet, die eine automatisierte Auswertung ermöglichen (siehe C).

4 Anwendungsbeispiel auf Hyperspektraldaten aus Feldsystemen

Für die Aufnahme von phänotypischen Daten auf Feldebene wurde von der LemnaTec GmbH im Jahre 2015 das erste Feldphänotypisierungssystem (*Scanalyzer Field*) in Rothamsted (UK) aufgebaut. Auf einer Größe von 10 m x 100 m bewegt eine krangestützte Plattform eine Sensorbox mit RGB-, IR-, Hyperspektral-, Fluoreszenz- und 3D Sensoren (DORNBUSCH *et al.* 2015). Die Position und der Messbereich können durch den in drei Achsen beweglichen Kran dynamisch angepasst werden. Die Daten werden in einer zentralen Datenbank abgelegt und können ähnlich zu den Gewächshausdaten mit *LemnaGrid* automatisiert bearbeitet werden. **Abbildung 5** zeigt neben dem *Scanalyzer Field* (PAULUS *et al.* 2015) die Verarbeitung von hyperspektralen Daten mittels des NDVI-Index (Normalized Differenced Vegetation Index (BEHMANN *et al.* 2014)). Die Sensordaten wurden am 24.6.2015 in Rothamsted aufgenommen und sind Teil eines Expe-

rimentes zur Kartographierung von Stickstoffverteilungen. Das Resultat ist eine Karte, die die Stickstoffverteilung auf Feldebene zeigt.

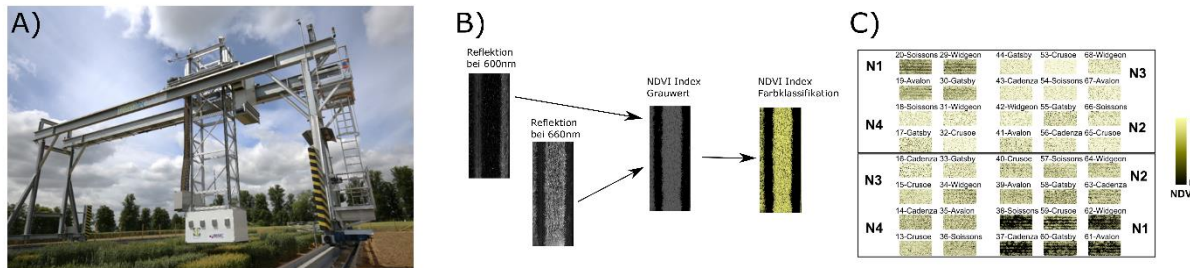


Abbildung 5: Die Übertragung von Labormethoden auf die Feldebene bringt neben hohen Anforderungen an die Sensortechnik auch hohe Anforderungen an die Hochdurchsatzanalyse mit sich. Krangestützte Sensorsysteme (A) ermöglichen die Aufnahme von hyperspektralen Datenkuben auf Feldebene. Diese können z.B. zu Vegetationsindizes wie dem NDVI (B) zusammengefasst werden. Das Ergebnis sind Feldkarten, die unterschiedliche Behandlungen der einzelnen Plots auf dem Feld klar voneinander abgrenzen (C).

Diese Prozesskette lässt sich auf einfache Art und Weise zur Generierung weiterer Parameterkarten erweitern. Ähnliche Karten lassen sich aus Fluoreszenz- oder 3D-Sensoren aufbereiten (PAULUS *et al.* 2015). So ist die Darstellung des Reifegrades durch die entsprechende Parametrisierung und Verarbeitung möglich, genauso wie eine Aussage über Wuchshöhen und Ährenanzahl. Die Qualität ist dabei abhängig von der Auflösung des verwendeten Sensors, der Messgeschwindigkeit, der Kalibrierung und den Wetterverhältnissen.

5 Diskussion und Conclusion

Die Software *LemnaGrid* der LemnaTec GmbH ermöglicht die grafische Kombination einzelner Bildverarbeitungsalgorithmen zu einer Gesamtauswertungsprozedur für Bilddaten verschiedener Sensoren. Dabei können neben RGB und IR/NIR-Aufnahmen auch Hyperspektral- und Fluoreszenzdaten ausgewertet werden. Neben den bekannten Auswertalgorithmen zur Segmentierung des Vordergrundes oder der Klassifikation der Farbe werden in Zukunft Algorithmen aus dem Machine Learning, also des überwachten und unüberwachten Lernens, bei der Entwicklung des *LemnaGrid* Softwaretools eine große Rolle spielen. Ebenso werden die Algorithmen und Möglichkeiten der Software zur Nutzung verschiedener neuer Sensordaten wie 3D Geometriedaten erweitert. Weiterhin ist die Fusion verschiedener Sensorbilder ein erklärtes Ziel für zukünftige Versionen.

Die Software ermöglicht die anwenderfreundliche Zusammenstellung von Bildverarbeitungsroutinen zu einer komplexen Auswertepipeline mit dem Ziel Parameter aus Pflan-

zendaten abzuleiten. Durch die vollautomatisierte Auswertung zeitlicher Messfolgen ist es möglich, Wachstumsdynamiken sichtbar zu machen und auszuwerten.

Die intuitive Kombination einzelner Bausteine zu einer komplexen Auswertepipeline ermöglicht eine differenzierte Auswertung von Daten aus unterschiedlicher Sensorquellen, aufgenommen über mehrere Tage und Wochen und die direkte Nutzung der Wachstumsparameter. Einzelne Bausteine und Auswertekombinationen können wiederverwendet werden und auf neue Experimente, Pflanzen und Zusammenhänge angepasst werden.

Die Software *LemnaGrid* stellt ein intuitives Werkzeug zur dynamischen Auswertung pflanzlicher Experimente dar und ermöglicht die Nutzung komplexer Auswertelgorithmen für bildbasierte Sensordaten.

Literaturverzeichnis

- BEHMANN J., STEINRÜCKEN J., PLÜMER L. (2014):** Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 93, 98-111.
- BRIEN C., BERGER B., RABIE H., TESTER M. (2013):** Accounting for variation in designing greenhouse experiments with special reference to greenhouses containing plants on conveyor systems. *Plant Methods* 9, 5.
- DORNBUSCH T., HAWKESFORD M., JANSEN M., NAGEL K., NIEHAUS B., PAULUS S., VIRLET N. (2015):** Digital Field Phenotyping by LemnaTec. Technical Report, 1-48.
- FIORANI F., SCHURR U. (2013):** Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annual Review of Plant Biology* 64, 267-297.
- FURBANK R., TESTER M. (2011):** Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science* 16, 635 - 644.
- MAHLEIN A.-K., STEINER U., HILLNHÜTTER C., DEHNE H.-W., OERKE E.-C. (2012):** Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods*, 8:3.
- NEILSON E., EDWARDS A.M., BLOMSTEDT C., BERGER B., LINDBER MØLLER B., GLEADOW R. (2015):** Utilization of a high-throughput shoot imaging system to examine the dynamic phenotypic responses of a C4 cereal crop plant to nitrogen and water deficiency over time. *Journal of Experimental Botany* 66:7, 1817-1832.
- PAULUS S., DORNBUSCH T., NAGEL K. (2015):** Einführung von Multi-sensor Plattformen zur detaillierten Beschreibung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 2015, 82-91.
- PAULUS S., SCHUMANN H., KUHLMANN H., LÉON J. (2014):** High-precision laser scanning system for capturing. *Biosystems Engineering* 121, 1-11.
- RAHAMAN M., CHEN D., GILLANI Z., KLUKAS C., CHEN M. (2015):** Advanced phenotyping and phenotype data analysis for the study of plant growth and development. *Frontiers in Plant Science*.

23. Workshop
Computerbildanalyse in der Landwirtschaft

27. April 2017, Potsdam
Forschungsstandort Marquardt

Grußwort

"Digital ist besser" lautete der Titel des 1995 erschienen Musikalbums einer deutschen Indierock-Gruppe der Hamburger Schule. Was als kritisch besungen wurde, war im Jahr des ersten Computerbildanalyse-Workshops nicht weniger als die binäre Grundlage für komplexe Algorithmen von Bildverarbeitern der Agrar- und Gartenbauwissenschaften. Inzwischen haben interdisziplinäre Digitalisierungsbestrebungen ganze Lebens- und Wirtschaftsbereiche umgestaltet. Die in Deutschland bereits von enormen Technisierungs- und Automatisierungsleistungen gekennzeichnete Landwirtschaft ist davon nicht ausgenommen. Ohne digitale Datenverarbeitung wären unzählige Technologien der modernen Landwirtschaft schwierig bis gar nicht umzusetzen und noch lange nicht praxisreif. Beispiele hierfür sind optische Sensortechnologien im Einsatz auf autonomen Boden- und Flugroboterplattformen für ein ortsgenaues Pflanzenmonitoring auf Ackerflächen oder in Obstplantagen.

Begleitet von wissenschaftlichen Forschungsprojekten und begünstigt durch die hohe Verfügbarkeit günstiger elektronischer Bauteile, schreitet die Hardwareentwicklung für spezielle Anwendungen in der Landwirtschaft rasant voran. Es werden Roboter für den Feld-, Obst- und Weinbau entwickelt und zur Marktreife gebracht. Mit intelligenter Optik werden Unkräuter identifiziert und beseitigt und mit Hilfe räumlich hochauflösender Photogrammetrie können künftig Pflanzenschutzmittelanwendungen in Raumkulturen optimiert oder der Ertrag geschätzt werden.

Mit neuen Ansätzen der räumlichen Datenanalyse können einzelne Produktionsschritte teilflächenspezifisch optimiert werden, eine Herangehensweise, die als Precision Agriculture und in Verbindung mit mobilen, intelligenten Kommunikationsmitteln als "Smart Farming" bezeichnet wird. Gemeint ist hiermit im Wesentlichen eine differenzierte und zielgerichtete Bewirtschaftung (Düngung, Pflanzenschutz, Sortenwahl). Die erhobenen Datenmengen sind riesig und ermöglichen in Verbindung mit weiteren Quellen (Ertragsdaten, Wetterdaten, Geodaten) komplexe Interpretationen. Gleichzeitig aber wird uns "Big Data" sowohl analytisch als auch hinsichtlich rechtlicher Rahmenbedingungen in Zukunft noch vor große Herausforderungen stellen, für die aktuell keine verbindlichen Lösungen bereitstehen.

Globale Vision ist es, die digitalisierten Produktionssysteme so eng zu vernetzen dass die landwirtschaftliche Produktion adaptiv beeinflusst werden kann, gleichzeitig jedoch ressourceneffizienter und nachhaltiger wird. Dies öffnet den Markt für neue externe Dienstleister, die ihre Betätigungsfelder in der Archivierung und Auswertung der anfallenden Daten finden werden. Diese neu entstehenden Strukturen könnten die gewohnten Abläufe in der Landwirtschaft in Zukunft fundamental ändern.

In 2017 wird der CBA-Workshop zum ersten Mal auf dem neuen Forschungsstandort des ATB in Potsdam-Marquardt ausgerichtet. Wir danken dem Leiter der Station, Herrn Dr. Trost, für sein Entgegenkommen und seine Hilfe bei der Organisation. Wir danken

natürlich auch allen anderen fleißigen Helfern des ATB, die uns bei der Vorbereitung und Durchführung unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei Frau Gabbert, die die aufwendige Gestaltung des Tagungsbandes übernommen hat. Der Druck des Tagungsbandes wurde durch die ausstellenden Firmen und das ATB finanziell unterstützt, wofür wir uns ebenfalls bedanken.



Michael Pflanz



Michael Schirrmann

SYSTEMBONITUR IM VERSUCHSWESEN

BEFLIEGUNG MIT XR6-COPTER

Mit dem XR6 können Befliegungen schnell und einfach durchgeführt werden.

- ▶ Umfangreiche Schulung im Umgang mit dem Copter und der Datenprozessierung
- ▶ Einfache Flugplanung und automatisierter Wegpunktflug
- ▶ Stabiler Flug ermöglicht hohe Datenqualität und eine zuverlässige Datenerfassung
- ▶ Integration von verschiedenen Sensoren möglich



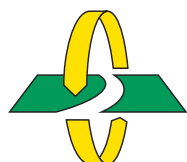
HOCHWERTIGE MULTISPEKTRALSENSORIK

Tetracam Multispektralkameras sind perfekt geeignet für das Versuchswesen. Die spektralen Kanäle sind frei wählbar und können den jeweiligen Wünschen angepasst werden. Das ermöglicht die parzellenspezifische Berechnung verschiedenster Indizes. Zusätzlich bietet Tetracam eine Kombination aus Multispektral- und RGB-Kamera oder Multispektral- und Thermalkamera an.

AUTOMATISIERTE BONITUR

geo-konzept bietet Komplettlösungen im Bereich UAV-gestützter Fernerkundung. Speziell im Versuchswesen ermöglicht geo-konzept mit seiner Software (MiniGIS) die Planung und exakte Anlage eines Versuchs, die Flugplanung für UAV-Missionen, sowie die automatisierte, parzellenspezifische Auswertung der erzeugten Daten. Die Bonituren erfolgen präzise, objektiv, effektiv und wiederholbar.

SPRECHEN SIE UNS AN!



geo-konzept
inventarisieren. kartieren. optimieren.

Tel. +49 (0)8424 89 89 0
Fax +49 (0)8424 89 89 80
geo@geo-konzept.de
www.geo-konzept.de



Compact. Affordable. Flexible.

Flame Blazes a New Path in Modular Spectroscopy

With interchangeable slits, high thermal stability and low unit to unit variation, the Flame spectrometer has forged a new standard in modular spectroscopy. Now Flame has expanded beyond the UV-Vis with the Flame-NIR (950-1650 nm) – compact, affordable and unlike any NIR spectrometer on the market. Choose Flame for:

- Identifying and monitoring ingredients and finished products at all process points
- Measuring the colour and consistency of solids and liquids
- Measuring parameters of raw and processed ingredients

Use Flame from lab to line to reduce costs and ensure consistent quality in all of your products.



MAY 10-13 | MESSE MÜNCHEN

Visit us at Booth A2.127



CiS GmbH
18182 Bentwisch, Hansestr. 21
Telefon: 0381/6302700
Fax: 0381/6302730
Email: info@cis-rostock.de
Internet: www.cis-rostock.de

Die CiS GmbH kann auf eine über 30-jährige Tradition bei der Arbeit mit graphischen und geographischen Informationssystemen verweisen. Das Unternehmen mit seinen 20 Mitarbeitern konzentriert sich auf die Konzeption, Entwicklung, Realisierung von

- Geographischen Informationssystemen – GIS
- Informationssystemen für Leitungsnetze – NIS
- Betriebsmittelinformationssystemen BIS

NIS / BIS – Fachschalen für Netzbetreiber und kommunale Zweckverbände
Geodatenservice

- Vermessungsleistungen
- Planung und Aufbau digitaler Kartenwerke

GIS Bereich Forschung & Entwicklung, Softwareentwicklung

- Informationssysteme für Landwirtschaft, Raumfahrt, Hydrographie,
- Navigationslösungen für die Seefahrt

GIS Bereich Anwendung

- Planung, Aufbau und Führung geographischer Informationssysteme
- Zeichen- und Einmessvorschriften
- Erstellen von Einsatzkonzeptionen

**Flächenbefliegung und 3D-Objektaufnahmen mit Multikopter- und Flächenflieger
Produktion und Vertrieb kompletter UAV-systeme für Landwirtschaft und Andere.**



REFERENZEN

Stadtwerke Rostock, Mainz, Riesa

Netzinformationssysteme

JKI Braunschweig, KSG-Agrar GmbH Kassow

UAV / UAS

Agrargenossenschaft Lindenberg

Agrarmanagementsystem

PodCopter



Flugobjekt als kabelgebundene Trägerplattform

Der **PodCopter** nutzt die Bildverarbeitung zum dauerhaften Autonomen Steuern im Bereich der Landwirtschaft, er fliegt permanent in vorgegebener Position zum Fahrzeug.

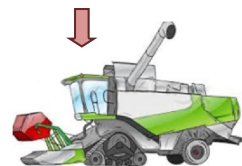
Dies ermöglicht eine unbegrenzte Auswertung von Sensoren in Echtzeit (online).

- **Automatischer Start und Landung**
- **Automatische Positionierung zum Fahrzeug**
- **Steuerung on Board**
(Positionierung mittels Kamera und Markierung am Fahrzeug)
- **Ausstattung mit beliebiger Sensorik**
 - Thermografie
 - 3D-Technik
 - Spektralmessung
 - Bildverarbeitungssystem
- **unbegrenzte Flugzeit**
- **Sichere Handhabung**
- **Kompatibel mit sämtlichen Fahrzeugen der Landwirtschaft**
(universell verwendbar)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



insensiv GmbH

Auf dem Esch 28

D - 33619 Bielefeld

Tel: +49(0) 521 - 32 99 47-0

Fax: +49(0) 521 - 32 99 47-99

info@insensiv.de

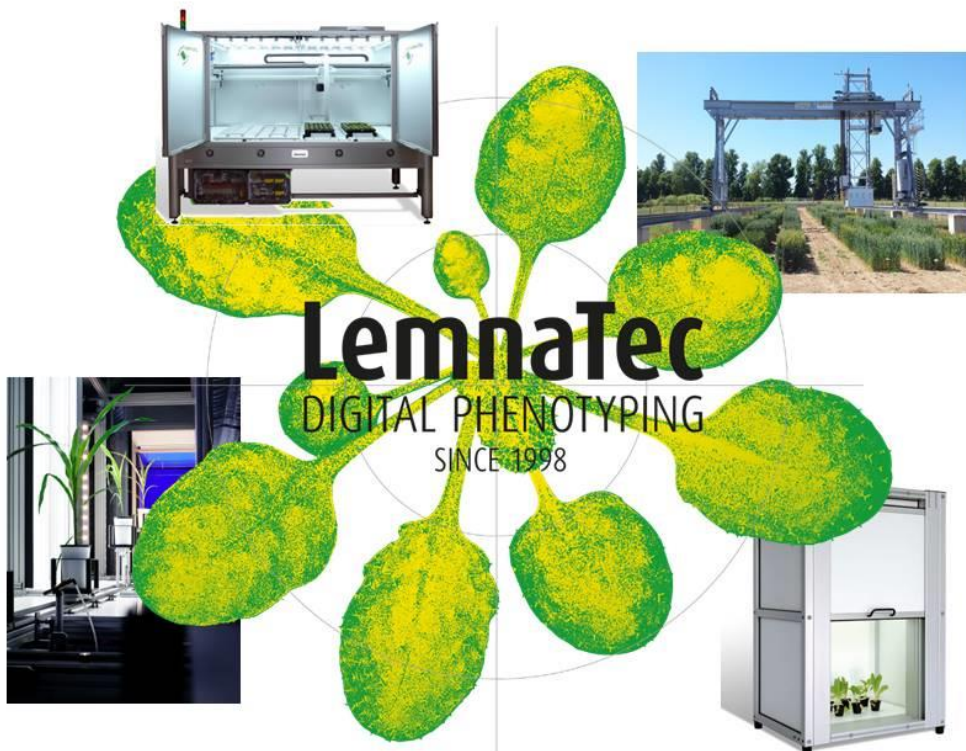
www.insensiv.de



Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

LEMNATEC

Since 1998, LemnaTec has led the development of plant phenotyping systems. Our award winning technology enables scientists to accurately measure the effects of climate and environment on plant development and to characterise genomic functionality. LemnaTec operates across the world with sales offices in Europe, North America, South America and Asia.



PHENOTYPING SOFTWARE

LEMNATEC-OS is a complete software system for phenotyping plants, seeds and small organisms. A suite of integrated modules automates phenotyping processes and analyses the resulting digital images. Complex routines can be automated quickly and easily and the software is capable of processing very high volumes of images and data.

SCANALYZER

LemnaTec's SCANALYZERS are used by scientists to monitor and quantify the development of plants and small organisms in the laboratory, greenhouse and outside in the field. We offer a comprehensive range of automated equipment to address thousands of different applications.

For further information please contact:

Innovation in der UAV-gestützten Land- und Forstwirtschaft.



www.hexapilots.de



HEXAPILOTS®
UNMANNED AERIAL SERVICES

0160 90318377

Maschinelles Lernen für Anwendungen in der Landwirtschaft

Ribana Roscher

*University of Bonn, Fernerkundung, Nußallee 15, 53115 Bonn, Germany
E-Mail: ribana.roscher@uni-bonn.de*

Maschinelles Lernen ist die Grundvoraussetzung für eine objektive und effiziente Analyse von landwirtschaftlichen Daten. Es beschäftigt sich mit der automatischen Erkennung von Mustern und Strukturen in den Daten um mit geeigneten Lernalgorithmen Aufgaben zu erfüllen wie der Klassifikation von Daten in verschiedene Kategorien. Für die meisten praktischen Anwendungen ist eine umfassende Verarbeitung notwendig um die originalen Sensordaten in geeignete Merkmale umzuwandeln, um so eine erfolgreiche Interpretation zu ermöglichen. Somit stellt das Lernen der Merkmale neben der Wahl eines leistungsstarken Lernalgorithmus eine der größten Herausforderungen dar. Dieser Vortrag gibt einen Überblick über Analyse- und Interpretationsverfahren für ausgewählte Anwendungen in der Landwirtschaft. Dies umfasst Techniken zur Objektdetektion in Bildern, unüberwachte Klassifikationsverfahren zur Detektion von Krankheiten und Methoden zur Integration von Vorwissen.

Automatische Ableitung geometrischer Pflanzenparameter aus UAS-Aufnahmen im Feldversuchswesen am Beispiel von Eisbergsalat

Automatic derivation of geometric crop parameters from UAS imagery for field trials with examples of iceberg lettuce

Görres Grenzdörffer

Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6, Rostock,
E-Mail: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

Zusammenfassung: UAS bzw. Drohnen werden in wenigen Jahren schon zum Standardwerkzeug im Feldversuchswesen gehören, da viele pflanzenbauliche relevante Informationen auf der Ebene der Einzelpflanzen mehr oder weniger automatisch aus den 3D-Geodaten extrahiert werden können. Am Beispiel eines Eisbergsalatversuchs wird der generelle Workflow vorgestellt und erläutert.

Deskriptoren: Feldversuchswesen, UAS, Photogrammetrie, 3D-Punktwolke,

Abstract: *In a few years, UAS or Drones will be a standard tool for field trials, since many plant-related relevant information can be extracted more or less automatically from the 3D geodata at the level of the individual plants. The general workflow is presented and explained using the example of an iceberg salad trial.*

Keywords: *field trials, UAS, Photogrammetry, 3D-point cloud*

1 Einleitung

Unbemannte Flugsysteme (UAS) sind für das Feldversuchswesen in vielerlei Weise ein prädestiniertes Anwendungsfeld, da viele pflanzenbaulich relevante Informationen zu definierten Zeitpunkten, schnell, berührungslos, objektiv, und automatisiert erfasst werden können. Auch das Thema Phenotyping ist im Kontext von großem Interesse, da in Abhängigkeit der Kultur eine Identifikation der Einzelpflanze möglich ist, und deren Wachstumsverlauf individuell erfasst, verglichen und bewertet werden kann.

1.1 Auf die Auflösung kommt es an

Der Begriff der Auflösung ist in der Fernerkundung ein sehr zentraler, denn er bestimmt was aus den Luftbildinformationen extrahiert werden kann. Dabei unterscheidet man zwischen räumlicher, radiometrischer, spektraler und temporaler Auflösung.

Die mehr oder wenige freie Wahl der räumlichen Auflösung, bzw. der Bodenauflösung beim Einsatz von Flugrobotern vervielfachen die Anwendungsmöglichkeiten, denn die freie Skalierbarkeit ermöglicht sowohl den selektiven Blick auf die einzelne Pflanze als auch den großen Überblick des Pflanzenbestandes aus der Vogelperspektive.

In der Praxis gibt es zwei Möglichkeiten die Bodenauflösung zu variieren. Zum einen über die Flughöhe, d.h. bei größerer Flughöhe wird die Bodenauflösung geringer. Oder zum anderen über die Brennweite, d.h. bei gleicher Flughöhe kann mit einer längeren Brennweite (Zoom) eine höhere Bodenauflösung erzielt werden. Mit der Bodenauflösung eng verbunden ist die räumliche Skala, bzw. Betrachtungsebene, die von der Blattebene über die Einzelpflanzenebene bis zur Parzellen- und Bestandsebene reicht. Die Bodenauflösung ist deshalb in mehrerlei Hinsicht von großer Bedeutung und hat auch diverse Konsequenzen zur Folge:

1. Die Bodenauflösung bestimmt über die Erkennbarkeit bzw. Trennbarkeit einzelner Objekte und somit auch über die Skalenebene. Bei höchster Bodenauflösung im mm-Bereich können einzelne Blätter, bzw. deren Aufbau und Struktur identifiziert werden. Diese hohen Bodenauflösungen werden in der Regel im Labor realisiert. Bei Bodenauflösungen von 0.5 - 4 cm können, je nach Pflanzenart und Entwicklungsstadium, größere Blätter und einzelne Pflanzen eindeutig separiert werden. Bei Bodenauflösungen von < 4 cm beginnt der Übergang zur Parzellen- bzw. Bestandsebene, d.h. einzelne Pflanzen können nicht mehr separiert werden und der Sensor zeichnet ein Mischsignal auf, dass sich aus mehreren Komponenten (Pflanze, Schatten, Boden) zusammensetzt, wie wir es aus der Flugzeug oder Satellitenfernerkundung kennen.
2. Der Befliegungs- und Speicheraufwand steigt exponentiell mit der Bodenauflösung. Eine Halbierung der Bodenauflösung bedeutet gleichzeitig eine Vervierfachung der Datenmenge und der Flugzeit.
3. Mit den Skalenübergängen sind verschiedene Probleme verbunden. Das betrifft insbesondere die Tatsache, dass sich die spektralen Reflexionseigenschaften stark verändern, je nachdem ob diese an einem einzelnen Blatt(teil) (Leaf Level) gemessen werden oder einen Mittelwert aus mehreren Komponenten, wie etwa Boden, Pflanze und Schattenanteilen (canopy level) darstellen. Da die Sonne als Lichtquelle fungiert, ändern sich die Einstrahlungsbedingungen in Abhängigkeit des Sonnenstandes, der Lichtstärke (Wolkenbedeckung) und der Pflanzenarchitektur. Darüber hinaus ändern sich die Reflexionseigenschaften auch kontinuierlich während des Pflanzenwachstums und durch Stress. Um es an dieser Stelle abzukürzen, eine quantitative Ableitung von biophysikalischen Parametern in einer Skala und über Skalengrenzen hinweg ist sehr diffizil und Gegenstand vieler Forschungsaktivitäten. Allerdings wird es noch einige Zeit dauern, bis ausgereifte und automatisierte Verfahren zur Verfügung stehen.

Der besondere und einzigartige Vorteil UAS-gestützter Fernerkundung ist die hohe zeitliche (temporale) Auflösung mit der die hochaufgelösten fernerkundlichen Daten erhoben werden können. Da unterhalb der Wolken geflogen werden kann, ist es möglich nahezu an jedem Tag zu fliegen. Man ist also nicht mehr unbedingt auf wolkenlosen Himmel angewiesen, sondern kann auch bei bedecktem Himmel fliegen, was insbesondere die spektrale Kalibrierung stark vereinfachen kann, da die bidirektionalen Reflexionseigenschaften (BRDF) des direkt einfallenden Sonnenlichts nicht berücksichtigt und modelliert werden müssen. Zudem kann man vor Ort flexibel auf wechselnde Witterungsbedingungen reagieren und - wenn möglich - die sonnigen oder voll bedeckten Minuten, bzw. Stunden voll ausnützen. Die damit mögliche kontinuierliche Erfassung des Aufwuchses eröffnet viele neue Anwendungsmöglichkeiten, um z.B. den Verlauf der Pflanzenentwicklung und somit auch Prozesse, wie die Düngeaufnahme und den Verlauf von Pflanzenkrankheiten zu erfassen und zu dokumentieren. Das setzt allerdings voraus, dass die Datenprozessierung und -auswertung mehr oder weniger automatisch geschieht.

Auf der Grundlage eines systematischen Bildflugs, entsprechende Passpunkte und eine solide photogrammetrische Datenauswertung vorausgesetzt, liefern UAS-Aufnahmen nicht nur zweidimensionale Bilder sondern dreidimensionale Geodaten, die sich entsprechend (automatisch) auswerten und interpretieren lassen. Zusammengefasst lassen sich aus den UAS-Aufnahmen viele Informationen ableiten, bei denen die geometrischen, spektralen oder temporalen Eigenschaften der Pflanzenentwicklung im Vordergrund stehen. Geometrische Parameter, wie die Wuchshöhe oder auch der Bodenbedeckungsgrad lassen sich mit preisgünstigen Sensoren (Farbdigitalkamera) weitestgehend automatisch berechnen, und sollen deshalb im nachfolgenden genauer vorgestellt werden. **Abbildung 1.** gibt einen groben Überblick über die aus UAS-Aufnahmen ableitbaren Informationen in Abhängigkeit ihrer geometrischen, spektralen und temporalen Auflösung. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass manche der in **Abbildung 1** aufgeführten Parameter nur zu bestimmten phänologischen Entwicklungsstadien zu beobachten sind.

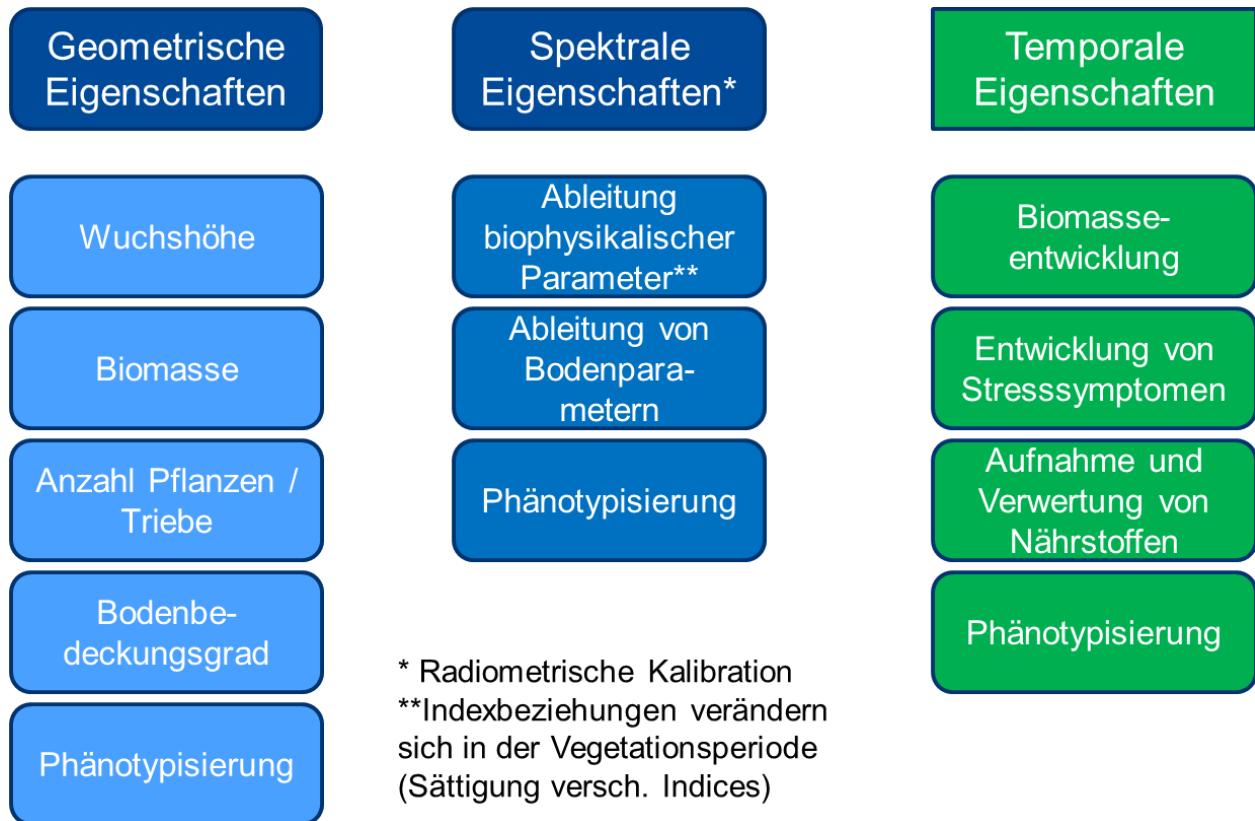


Abbildung 1: Übersicht verschiedener Informationen bzw. Pflanzeigenschaften für das Feldversuchswesen, die aus UAS-Aufnahmen ableitbar sind

In Abhängigkeit der gewählten Bodenauflösung (Bestandsebene oder Einzelpflanzenebene) und der betrachteten Kultur lassen sich verschiedene geometrischen Informationen, wie z.B. die Wuchshöhe (GRENZDÖRFFER 2014), der Bedeckungsgrad (TORRES-SANCHEZ *et al.* 2014), individuelle Pflanzen und/oder Unkräuter mit einem hohen Automationsgrad bestimmen. Während der Fokus dieses Beitrags auf der Ableitung geometrischer Parameter liegt, ist es natürlich auch möglich die Spektralwerte einer RGB-Kamera zu nutzen, um diese beispielsweise mit biophysikalischen Parametern zu korrelieren, z.B. RASMUSSEN *et al.* 2016 oder SCHIRRMANN *et al.* 2016.

Gleichwohl ist es nicht so, dass man einfach mit einem UAS und Kamera über ein Versuchsfeld fliegt und die gewünschten Daten erscheinen automatisch und wohl strukturiert auf dem heimischen Computer. Vielmehr sind an die jeweilige Kultur und Fragestellung angepasste Befliegungs- und Auswertestrategien zu entwickeln.

Schwerpunkt des Beitrags ist die Vorstellung von verschiedenen automatisch abgeleiteten geometrischen Parametern anhand eines Eisbergsalatversuchs. Dazu wurden drei UAS Befliegungen in geringer Höhe, d.h. 10 – 20 m durchgeführt, um einzelne Pflanzen identifizieren, analysieren und bewerten zu können. Ziel des Eisbergsalatversuchs im Sommer 2015 war es, die individuellen Pflanzen nach der Pflanzung möglichst automatisch zu erfassen und das Wachstum der Pflanzen zu beobachten.

2 Material und Methoden

Dem individuellen Teil des nachfolgend vorgestellten Versuchs wird ein allgemeiner, methodischer Teil vorangestellt, der die Aufnahme und photogrammetrische Auswertung der UAS-Bilder beschreibt.

2.1 UAS Bildflüge

Über den Testflächen wurden drei UAS Befliegungen mit einem Falcon 8 der Firma Intel in geringer Höhe, d.h. 10 – 20 m durchgeführt. Als Payload kam eine RGB-Kamera (Sony NEX 5) zum Einsatz. Die aus der Flughöhe, der Sensorgröße und der Brennweite resultierende Bodenauflösung betrug 3 – 6 mm pro Pixel. Die Befliegungen erfolgten systematisch mit einer Längs- und Querüberlappung von 80% bzw. 60%. Die Bilder wurden mit der Software Photoscan Professional (Agisoft LLC) und mehreren hochgenau eingemessenen signalisierten Passpunkten photogrammetrisch ausgewertet. Die absolute Lage- und Höhengenaugkeit ist durch die mit GPS eingemessenen Passpunkte limitiert und lag bei 1 – 2 cm. Gleichwohl ist eine Grundvoraussetzung für multitemporale Auswertungen erfüllt, da die verschiedenen Epochen lagerichtig mit einander verglichen werden können. Als Ergebnis der photogrammetrischen Prozessierung standen ein digitales Orthophoto, die 3D-Punktvolke und das daraus abgeleitete digitale Oberflächenmodell (DOM).

Im Gegensatz zum Orthophoto, dass in der Regel auf die Größe eines Bildpixels gerechnet wird, wird die 3D-Punktvolke bzw. DOM aus verschiedenen Gründen häufig in einer geringeren Auflösung berechnet und darüber hinaus oft auch gefiltert, bzw. geglättet. Der wesentliche Grund für die Verwendung einer verringerten Auflösung, ist die damit verbundene Zeitersparnis, da das Stereo- bzw. Multi-ray-matching ein sehr rechenintensiver Schritt ist. Der Zeitaufwand und die Anzahl der berechneten Punkte nehmen exponentiell zu, während die absolute Höhengenaugkeit kaum steigt, bzw. das Rauschen eher zunimmt. Der nachfolgende Vergleich auf der Basis von 104 Aufnahmen soll dies verdeutlichen.

Tabelle 1: Vergleich aus Luftbildern abgeleiteter 3D-Punktvolken in Abh. der Softwareeinstellungen bei Agisoft Photoscan Professional (Vers. 1.25) und der Software SURE

	Lowest	Low	Medium	High	SURE
Dauer (ca.)*	2 Min	20 Min.	110 Min	583 Min.	700 Min.
Anz. Punkte	693.110	3.027.101	12.964.793	53.344.487	2.523.962.588
GSD DEM	5 cm	2.5 cm	1.25 cm	0.625 cm	0.3 cm

* Rechenzeit auf PC mit 32 GB-RAM

Der Vergleich zeigt auch, dass erst ab einer bestimmten Stufe, bzw. Bodenauflösung der Übergang von der Bestandsebene hin zur Charakterisierung individueller Pflanzen in der 3D-Punktwolke möglich ist.

2.2 Eisbergsalat Versuch, Sommer 2015

Die Pflanzen waren zur ersten Befliegung kurz nach der Pflanzung im Drei bis Fünfblattstadium und ca. 3 – 5 cm groß. Zur Identifikation wurde ein spezieller Workflow entwickelt, der in einem ersten Schritt die Trennung der grünen Pflanzen und dem Boden beinhaltet. Dazu wurde der Vegetationsindex VARI verwandt (STARK *et al.* 2000). Über einen Schwellwert konnte eine zuverlässige Trennung zwischen Boden und den Pflanzen erreicht werden. Anschließend wurden die identifizierten Vegetationspixel morphologisch gefiltert, vektorisiert, gebuffert und über einen Größenfilter Setzlinge von anderen Pflanzen oder Fehlzuordnungen getrennt.

3 Ergebnisse

Der Klassifikationserfolg lag in Abhängigkeit der Pflanzmethode zwischen 5 und über 95%, vgl. **Abbildung 2**. Die große Variation im Klassifikationserfolg erklärt sich durch den eigentlich zu frühen Befliegungstermin. Ein Teil der Pflanzen waren verschlämmt und sehr klein und somit auf den Bildern schlicht und ergreifend nicht sichtbar. Da half auch eine höhere Bodenauflösung aus der 10 m Befliegung nichts, die Ergebnisse aus der 10 und 20 m Befliegung unterschieden sich nur marginal. Aus diesem Grund musste interaktiv nachgearbeitet werden. Auf der Grundlage der identifizierten Pflanzen konnten im Anschluss mehrere Informationen abgeleitet werden.



Abbildung 2: Automatisch klassifizierte Salatpflanzen im Drei- bis Fünfblattstadium, Datengrundlage UAS-Orthophoto vom 20.6.2015

Unter anderem der zur Verfügung stehende Wuchsraum der einzelnen Pflanzen, der sich aus dem Abstand der Pflanzen untereinander berechnet und als Thiessenpolygon darstellen lässt, siehe **Abbildung 3**.

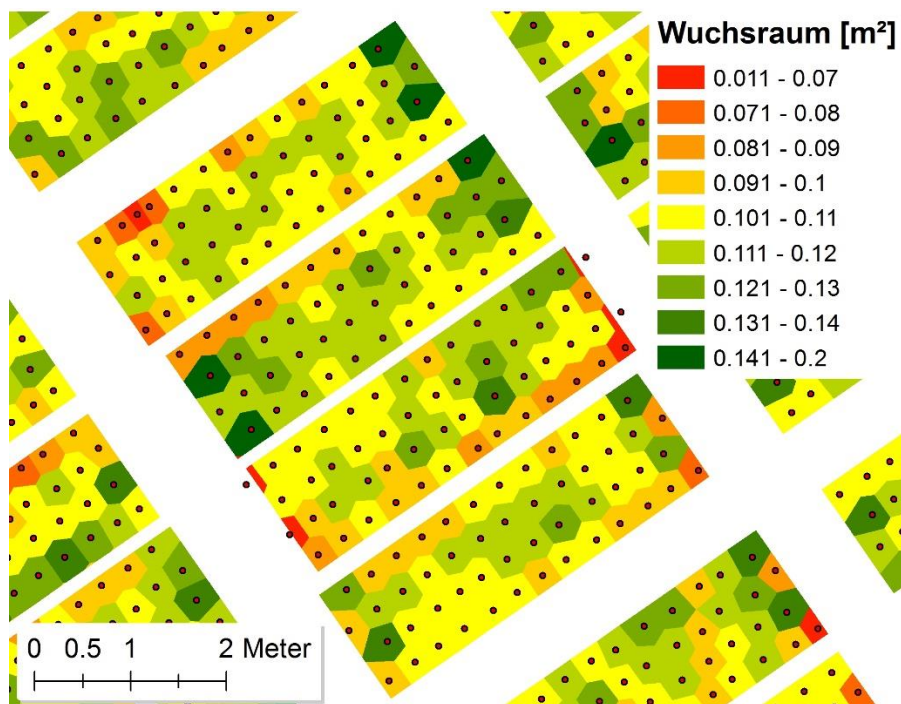


Abbildung 3: Individueller Wuchsraum pro Eisbergsalatpflanze in m², Datengrundlage UAS-Orthophoto vom 20.6.2015

Im Laufe der Vegetationsperiode haben die Salatpflanzen den vorhandenen Wuchsraum komplett ausgenutzt und die äußeren Hüllblätter überlappen sich teilweise. Gleichwohl konnte das Wachstum der einzelnen Pflanzen beobachtet werden. Zur Bestimmung des Aufwuchses wurden die Höhen und Volumen über eine Differenz zur ersten Epoche ermittelt, vgl. **Abbildung 4**. Das Volumen eines Salatkopfes wurde über die Summe der Höhen in einem Kreis mit einem Durchmesser von 25 cm definiert.

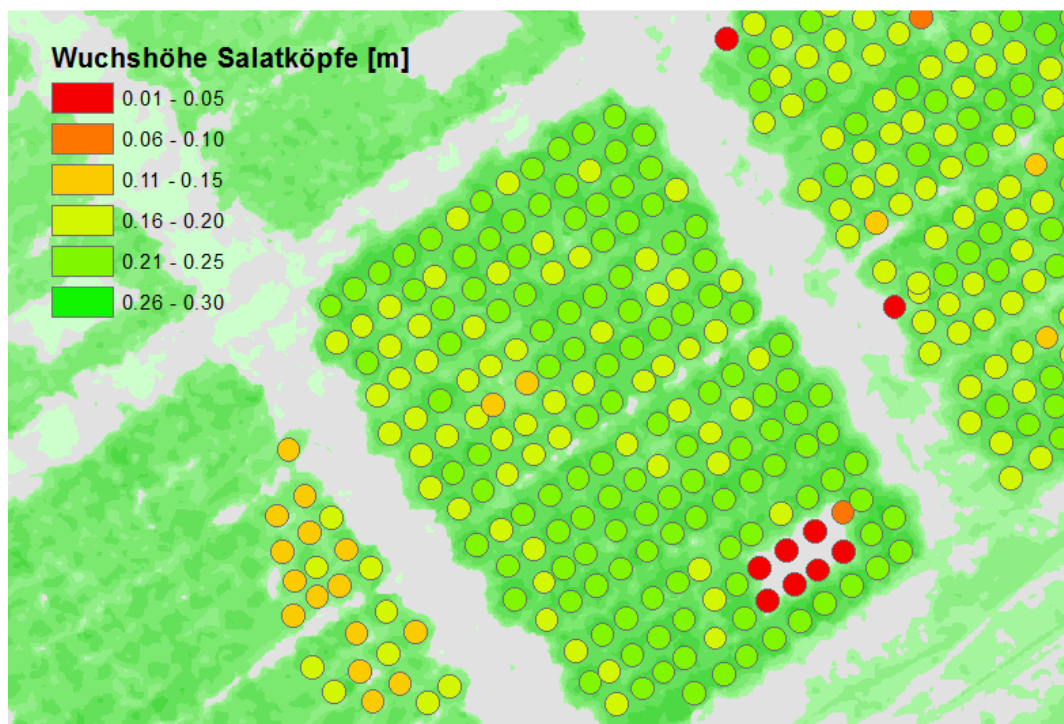


Abbildung 4: Automatisch berechnete Wuchshöhe von Eisbergsalatköpfen, Bildflug 29.07.2015, Salatköpfe mit Wuchshöhen < 5 cm sind vor dem Bildflug geerntet worden.

Dabei zeigte sich, dass das Wachstumsverhalten der Pflanzen – erwartungsgemäß - in Abhängigkeit der Prüfglieder unterschiedlich war und auch innerhalb der verschiedenen Parzellen variierte.

Leider wurden die Salatköpfe vor den letzten Befliegungen teilweise geerntet, so dass eine Korrelation zwischen dem aus den Bildern ermittelten Volumen und der Biomasse nicht berechnet werden konnte.

Es bleibt festzuhalten, dass mit der individuellen Betrachtungsweise viele interessante Daten gewonnen werden können, wie z.B. Information zur Variabilität innerhalb einer Parzelle. Zudem können individuelle Ausreißer, Randeffekte etc. identifiziert werden. Neben den automatisch abgeleiteten Informationen liefern die sehr hoch aufgelösten UAS-Bilddaten noch viele weitere Informationen die in der üblichen statistischen Betrachtungsweise der Bonituren keinen oder nur einen geringen Niederschlag finden, z.B. zur Blattstellung und Blattform, zum Lochfraß durch Insekten, Verunkrautung, Schäden durch Vogelfraß, den Bedeckungsgrad und vieles mehr.

4 Diskussion

Zukünftige Forschungen sollen im Dialog mit den Experten und Versuchsanstellern weitere pflanzenbaulich interessante Parameter für die jeweilige Kultur identifizieren und diese möglichst automatisch erfassen und validieren. Der phänologische Befliegungszeitpunkt spielt für viele Fragestellungen eine entscheidende Rolle, auch hier ist ein Lernprozess von Nöten, da sich manche Entwicklungsphasen bei einer manuellen Bonitur zu einem anderen Zeitpunkt differenzierbar sind als aus der Vogelperspektive. Kurzum, es ist und bleibt spannend.

Literaturverzeichnis

- GRENZDÖRFFER G. (2014):** Crop Height Determination with UAS Point Clouds.- Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-1, pp. 135-140, doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-135-2014.
- RASMUSSEN J., NTAKOS G., NIELSEN J., SVENSGAARD J., POULSEN R.N., CHRISTENSEN S. (2016):** Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? Eur. J. Agron. 2016, **74**, pp. 75–92.
- SCHIRRMANN M., GIEBEL A., GLEINIGER F., PFLANZ M., LENTSCHKE J., DAMMER K.-H. (2016):** Monitoring Agronomic Parameters of Winter Wheat Crops with Low-Cost UAV Imagery.- Remote Sens. 2016, **8**, 706; doi:10.3390/rs8090706.
- STARK R., GITELSON A., GRITS U., RUNDQUIST D., KAUFMAN Y. (2000):** New technique for remote estimation of vegetation fraction: principles, algorithms and validation, Aspects of Applied Biology, **60**, pp. 241 - 246.
- TORRES-SÁNCHEZ J. PEÑA J.M., DE CASTRO A.I., LÓPEZ-GRANADOS F. (2014):** Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV.- Computers and Electronics in Agriculture **103**, pp. 104–113.

Höhenwachstum im Weizen: Genotypen unterscheiden sich bezüglich kritischer Stadien und in ihrer Temperaturabhängigkeit des Wachstums

Monitoring the dynamics of wheat stem elongation: Genotypes differ at critical stages and in growth response to temperature

Lukas Kronenberg, Kang Yu, Achim Walter, Andreas Hund

*ETH Zürich Kulturpflanzenwissenschaften, Universitätsstrasse 2, LFW A8, 8092 Zürich
E-Mail: lukas.kronenberg@usys.ethz.ch*

Zusammenfassung: Die Dauer des Höhenwachstums im Weizen ist kritisch für den Ertrag und wird durch die Temperatur bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit des Wachstums während dieser Phase ist daher ein wichtiges Merkmal in Bezug auf die Anpassung der Kultur an verschiedene Umwelten. Um die Wachstumsdynamik und ihre Reaktion auf die Temperatur zu quantifizieren, ist eine genaue Erfassung der Bestandeshöhe in hoher zeitlicher Auflösung erforderlich. Terrestrisches 3D-Laserscanning (TLS) wurde vor kurzem als neuartiges Werkzeug für Pflanzenhöhenmessungen im Feld etabliert.

In unserer Studie haben wir TLS auf der Fläche der Feld-Phänotypisierungsanlage (FIP) der ETH eingesetzt. Die FIP ist eine neuartige multisensorische Phänotypisierungsplattform, die basierend auf einem Seilzugsystem Messungen an beliebigen Positionen auf einem 1 ha großen Feld ermöglicht. Im Versuch wurde die Bestandeshöhe von 335 Winterweizensorten im Abstand von 3 Tagen während der gesamten Dauer des Höhenwachstums gemessen. Die Ziele der Arbeit waren die Anwendbarkeit des FIP-TLS Systems für das Erfassen der Bestandeshöhe im Weizen in Bezug auf Genauigkeit und Durchsatz zu prüfen und genotypische Unterschiede in der Wachstumsdynamik und deren Reaktion zur Temperatur zu untersuchen.

Der TLS-Ansatz eignete sich für die genaue Erfassung der Bestandeshöhe ($R^2 = 0,99$ im Vergleich zu manuellen Messungen) mit hohem Durchsatz. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bestandeshöhe linear mit der Thermalzeit zunahm. Basierend auf dieser Linearität wurden 15% und 95% der Endhöhe als Annäherung für den Beginn und das Ende des Höhenwachstums verwendet. Wir beobachteten eine hohe Erblichkeit zwischen 0,76 und 0,91 für den Beginn, das Ende und die Dauer des Höhenwachstums. Der Beginn des Höhenwachstums zeigte eine positive Kovarianz mit dem Ende des Höhenwachstums und der Endhöhe, was regulatorische Abhängigkeiten impliziert. Dennoch gab es keine offensichtliche Beziehung zwischen Beginn und Dauer des Höhenwachstums. Die Wachstumsraten unterscheiden sich deutlich zwischen den Messintervallen

und zwischen den Genotypen. Eine Varianzanalyse ergab signifikante genotypische Effekte für die kurzfristige Reaktion des Wachstums auf Temperatur- und Dampfdruckdefizit ($p < 0,001$) mit Heritabilitäten von 0,4 bzw. 0,6.

Aufgrund seiner Präzision ermöglicht die TLS-Methode, die Dynamik des Höhenwachstums in großen Populationen zu messen. Dies bietet Möglichkeiten, die genetische Kontrolle der Übergänge zwischen dem frühen vegetativen Wachstum, dem Höhenwachstum und der Blüte zu untersuchen.

Deskriptoren: Weizen, Höhenwachstum, Wachstum, Phänotypisierung, Entwicklung

Abstract: *The duration of stem elongation (SE) in wheat is critical for yield and is driven by temperature. Wheat growth response to temperature during this phase is therefore an important trait in terms of crop adaptation to different environments and yield. In order to quantify SE growth dynamics and their response to temperature, accurate plant height measurements in high temporal resolution are required. Using traditional measuring tools, this is tedious and labour costly. Terrestrial 3D laser scanning (TLS) has recently been presented as a novel tool for plant height measurements in the field.*

In our study, we used TLS with a scanner mounted on the ETH field phenotyping platform (FIP) to measure plant height in a field trial comprising 335 winter wheat varieties in 3-day intervals during the whole stem elongation period. The FIP is a novel multisensory phenotyping platform that covers a 1 ha field by means of a rope suspended sensor head. The aims were to test the measurement systems capability of plant height measurement in terms of accuracy and throughput and investigate genotypic differences in growth dynamics and in growth response to temperature during SE.

The TLS approach was shown to be suitable for highly accurate plant height measurements ($R^2 = 0.99$ compared to manual measurements) at high throughput. The results showed that canopy height increased linearly with thermal time. Based on this linearity, 15% and 95% of final height were used as proxy measures for the onset and termination of stem elongation, respectively. We observed high heritability between 0.76 and 0.91 for the onset, termination and duration of stem elongation. The onset of stem elongation showed a positive covariance with the termination of stem elongation and final height indicating some regulatory dependencies. Yet there was no apparent relationship between onset and duration of stem elongation. Daily growth rates differed markedly between measurement intervals and among genotypes. Analysis of variance yielded significant genotypic effects in short term growth response to temperature and vapour pressure deficit ($p < 0.001$), with heritabilities of 0.4 and 0.6 respectively.

Due to its precision, the TLS method allows to measure the dynamics of stem elongation in large sets of genotypes. This in turn offers opportunities to investigate the genetic control of the transitions between early vegetative growth, stem elongation and flowering.

Keywords: wheat, stem elongation, growth, phenotyping, development

1 Einleitung

Bei diesem Bericht handelt es sich um eine gekürzte, deutsche Übersetzung eines Forschungsartikels der aufgeführten Autoren, welcher bereits bei der Zeitschrift Euphytica zur Publikation eingereicht wurde (KRONENBERG et al. 2017, Submitted).

Die Dauer der Höhenwachstums-Phase ist kritisch für die Ertragsbildung im Weizen (*triticum aestivum*). Bezüglich Ertragsteigerung und Umwelanpassung von Weizen könnte diese Phase deshalb von züchterischem Interesse sein (MIRALLES *et al.* 2000, GONZÁLEZ *et al.* 2003). Unter Feldbedingungen beginnt die Höhenwachstumsphase nach der Bildung des endständigen Ährchens und endet mit der Blüte (SLAFER *et al.* 2009). In der Zeit dazwischen findet das aktive Ährenwachstum statt, weswegen die Höhenwachstumsphase kritisch für den Ertrag ist (FISCHER 1985).

Die Ährentrockenmasse hängt von der Länge der Ährenwachstumsphase und somit von der Dauer des Höhenwachstums ab (SLAFER *et al.* 1996). Eine verlängerte Höhenwachstumsphase führt zu einem höheren Ährengewicht und somit zu höherem Ertrag (SLAFER *et al.* 1996, MIRALLES & SLAFER 2007). Die Dauer des Höhenwachstums wiederum wird hauptsächlich durch die Umweltparameter Temperatur und Photoperiode beeinflusst (ATKINSON & PORTER 1996, McMASTER 2009). Die Dauer des Höhenwachstums könnte also über die Empfindlichkeit der Pflanze gegenüber diesen Umweltfaktoren verändert werden (WHITECHURCH *et al.* 2007). Über die genetischen Kontrolle der Dauer des Höhenwachstums bestehen jedoch noch viele Unklarheiten (FISCHER 2011), insbesondere in Bezug auf die Temperaturabhängigkeit (ATKINSON & PORTER 1996).

Die Quantifizierung von Wachstumsdynamiken im Höhenwachstum und deren Abhängigkeit von Umweltparametern erfordert eine genaue Erfassung der Bestandeshöhe in hoher zeitlicher Auflösung. Insbesondere für genetische Studien muss dies außerdem an einer großen Anzahl unterschiedlicher Genotypen zur gleichen Zeit geschehen. Herkömmlichen Messmethoden fehlt es dabei oft an nötigem Durchsatz und Genauigkeit.

Aus dem Bereich der Pflanzenphänotypisierung wurden in den letzten Jahren neue Messverfahren entwickelt, die auf unterschiedlichen optischen Sensoren basieren vgl. (WALTER *et al.* 2015). Als Mittel für das Erfassen der Pflanzenarchitektur unter Labor bzw. Gewächshausbedingungen etablierte sich das 3D-Laserscanning (DORNBUSCH *et al.* 2012, PAULUS *et al.* 2014). (FRIEDLI *et al.* 2016) verwendete terrestrisches 3D Laserscanning für die Erfassung der Bestandeshöhe in Mais, Soja und Weizen im Feld. An der ETH Zürich wurde unlängst eine moderne Feld-Phänotypisierungsanlage (FIP) entwickelt und installiert. Diese besteht aus einem Sensorkopf, der mittels einem Seilzugsystem in drei Dimensionen frei auf einem 1 ha großen Feld positioniert werden kann (KIRCHGESSNER *et al.* 2016). Mittels mehrerer optischer Sensoren lassen sich damit unterschiedliche Merkmale non-invasiv messen (KIRCHGESSNER *et al.* 2016). Auch das von (FRIEDLI *et al.* 2016) entwickelte TLS Konzept zur Erhebung der Bestandeshö-

he wurde in das System integriert und erfolgreich in Soja getestet (KIRCHGESSNER *et al.* 2016).

In der vorliegenden Arbeit wird die Bestandeshöhe im Feld mit dem FIP-TLS System in einem Set von 335 Europäischen Weizengenotypen erhoben. Die Ziele der Arbeit waren: (A) die Anwendbarkeit des FIP-TLS Systems für das Erfassen der Bestandeshöhe im Weizen in Bezug auf Genauigkeit und Durchsatz zu prüfen; (B) die Wachstumsdynamik in Europäischem Weizen während dem Höhenwachstum zu charakterisieren; und (C) die Hypothese zu prüfen, dass es in dieser Dynamik nennenswerte genotypische Unterschiede in kritischen Stadien gibt. Schließlich soll (D) die Interaktion zwischen unterschiedlichen Stadien und deren Zusammenhang mit der Endhöhe bestimmt werden.

2 Material und Methoden

Das Feldexperiment wurde in den beiden Jahren 2015 und 2016 auf der Forschungsstation Lindau-Eschikon der ETH Zürich durchgeführt. Ein Set von 335 Winterweizengenotypen bestehend aus 300 Sorten aus dem GABI Wheat Panel (KOLLERS *et al.* 2013), ergänzt mit wichtigen Schweizer Sorten wurde auf zwei Schlägen unter der FIP in jeweils 357 Parzellen (1.7 m x 1 m) ausgesät.

Die Bestandeshöhe mit einem FARO® Laser Scanner Focus3D S 120 (Faro Technologies Inc., Lake Mary USA) gemessen, der auf dem Sensorkopf der FIP installiert wurde (für eine detaillierte Beschreibung des Systems, siehe (KIRCHGESSNER *et al.* 2016)). Der Laserscanner nimmt eine dreidimensionale Punktwolke auf, die dem gescannten Bereich relativ zum Scanner entspricht. Von Anfang April bis Mitte Juli wurden auf jedem Schlag alle drei bis vier Tage 16 Scans an definierten Positionen aufgenommen. Mit der Software Faro Scene (Faro Technologies Inc., Lake Mary USA) wurden die 16 resultierenden 3D Punktwolken anschließend gegeneinander stationiert und zu einer einzigen Punktwolke fusioniert. Dies wurde durch acht stationäre Referenzkugeln (Durchmesser 20 cm; Laserscanning Europe GmbH., Magdeburg Deutschland) ermöglicht. Somit entstand eine digitale dreidimensionale Reproduktion des gemessenen Schlags.

Die durchschnittliche Bestandeshöhe für jede einzelne Parzelle wurde mit Hilfe der maßgefertigten MATLAB (version 2013b, The Math Works Inc., Natick, MA, 2000) Applikation CAHST für jedes Messdatum aus der entsprechenden Scanpunktwolke extrahiert. Die Software steht auf SourceForge (<http://sourceforge.net/projects/cahst4tls>) zum Download zur Verfügung. In einem ersten Schritt wurden die z-Koordinaten (also die Höhe jedes Scanpunktes) in jeder Punktwolke entsprechend dem Bodenniveau korrigiert. Im nächsten Schritt wurden die Punkthöhen aus dem Zentrum jeder Parzelle (ca. 0.5 m x 0.5 m) und die normalisierte kumulative Höhenfrequenz errechnet. Daraus wurde das 97^{te} Höhenperzentil als Bestandeshöhe der jeweiligen Parzelle definiert. Im ersten Jahr wurden außerdem an jedem Messtermin an 48 Parzellen pro Schlag Hand-

messungen durchgeführt. Hand- und TLS-Messungen wurden mittels linearer Regression verglichen, um die Genauigkeit der TLS-Messung zu prüfen.

Für die Analyse der Wachstumsdynamik wurde eine lineare Regression der Bestandeshöhe gegen Wachstumsgradtage (GDD) bis zum Erreichen der Endhöhe für jede Parzelle gemacht (Gleichung 1):

$$B = a + b \cdot GDD + \varepsilon \quad \text{Gl. 1}$$

Wobei B die Bestandeshöhe des jeweiligen Parzellen, a den Achsenabschnitt, b die Steigung, GDD die Anzahl Wachstumsgradtage (mit Basistemperatur 0) und ε den Residualfehler bezeichnet.

Außerdem wurden für jede Parzelle die Anzahl GDD bis zum Erreichen von 15% (GDD_{15}) und 95% (GDD_{95}) der Endhöhe (FH) berechnet. Die Dauer der Höhenwachstumsphase (GDD_{SE}) wurde aus der Differenz zwischen GDD_{95} und GDD_{15} bestimmt. Die fünf Parameter Endhöhe, Steigung (b) der linearen Regression zwischen Bestandeshöhe und GDD sowie GDD_{15} , GDD_{95} und GDD_{SE} wurden zur Quantifizierung des Genotyp spezifischen Wachstumsverhaltens verwendet.

Für jedes Merkmal wurde außerdem die Heritabilität aus den genotypischen Schätzwerten anhand Gleichung 2 berechnet:

$$h^2 = \frac{\sigma_G^2}{\sigma_G^2 + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{R}} \quad \text{Gl. 2}$$

Wobei σ_G^2 und σ_ε^2 die genotypische-, respektive die Fehlervarianz bezeichnen und $R = 2$ die Anzahl Replikate (Jahre) pro Genotyp (FALCONER & MACKAY 1996).

3 Ergebnisse

Die lineare Regression zwischen TLS und von Hand gemessener Bestandeshöhe über alle Messdaten hinweg ergab einen sehr starken, linearen Zusammenhang mit $R^2 = 0.99$, $a = -0.096$ und $b = 1.02$. Pearson-Korrelationskoeffizienten für individuelle Messdaten variierten zwischen 0.80 und 0.98.

Die Bestandeshöhen der einzelnen Parzellen entwickelten sich linear gegenüber GDD. Für das Jahr 2015 war das durchschnittliche Bestimmtheitsmass $R^2 = 0.98$ mit einer Spanne von 0.92 bis 0.99. Für das Jahr 2016 variierte R^2 zwischen 0.78 und 0.99, mit einem Mittelwert von 0.99.

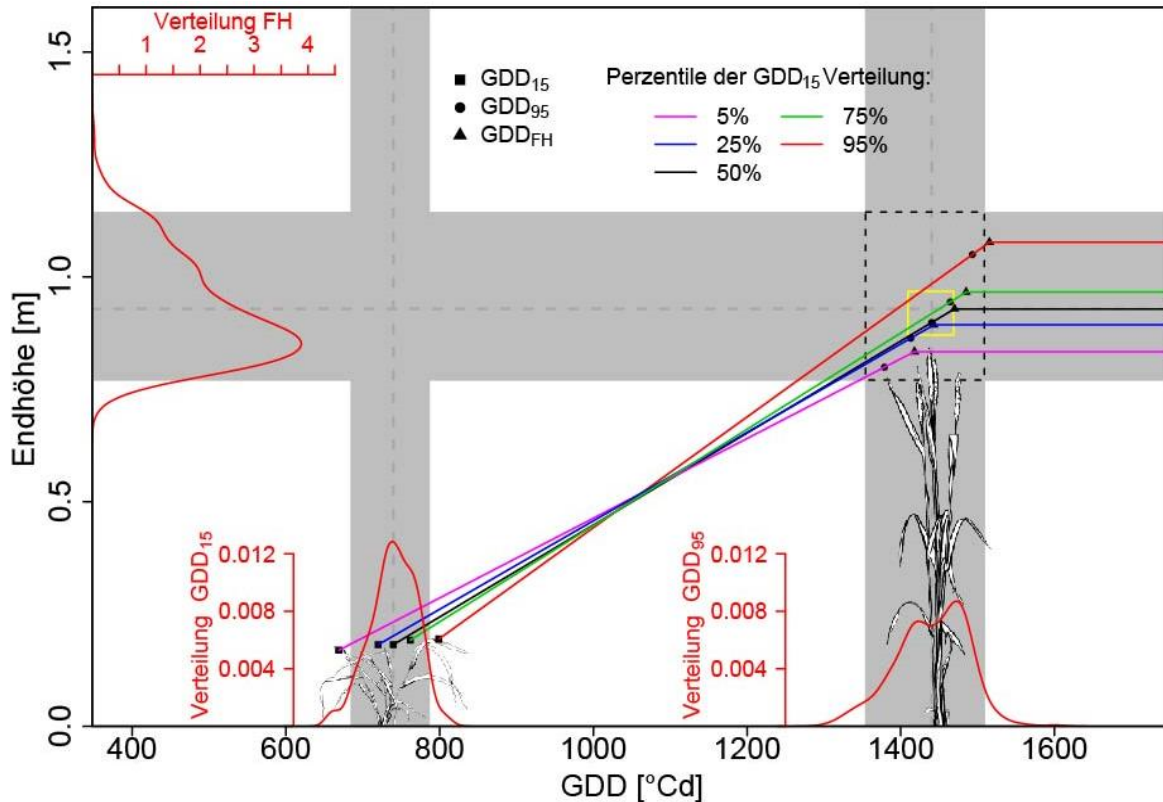


Abbildung 1: Abhängigkeiten zwischen GDD₁₅, GDD₉₅ und GDD_{SE} aus der Perspektive einer Selektion auf GDD₁₅ (Siehe Text). Die roten kurven geben die Verteilung der 335 Genotypen für GDD₁₅, GDD₉₅ und GDD_{SE}. (Grafik: KRONENBERG et al. 2017, Submitted)

Die Varianzanalyse ergab signifikante genotypische Unterschiede sowohl für die Steigung der linearen Höhenentwicklung, als auch für GDD₁₅, GDD₉₅, GDD_{SE} und FH über beide Jahre hinweg ($p < 0.001$). Alle diese Merkmale zeigten hohe Heritabilitäten (0.74 – 0.93) über beide Jahre. Die linearen Prädiktoren (BLUPs) der genotypischen Effekte zeigten große Variabilität, mit einer maximalen Differenz von 159 GDD für GDD₁₅, 298 GDD für GDD₉₅, 224 GDD für GDD_{SE} und 0.59 m für die Endhöhe (**Abbildung 1**). Eine Korrelationsanalyse unter den für die Klassifizierung des Genotyp-spezifischen Wachstumsverhalts verwendeten Merkmale zeigte eine starke Korrelation zwischen GDD₁₅ und GDD₉₅ ($r = 0.62$) sowie zwischen GDD₉₅ und GDD_{SE} ($r = 0.72$). Die Korrelation zwischen GDD₁₅, GDD₉₅ und GDD_{SE} implizieren, dass diese Stadien zum Teil voneinander abhängig sind. Die Abhängigkeiten unter den einzelnen Merkmalen legen nahe, dass sie innerhalb der untersuchten Population nicht unabhängig voneinander selektierbar sind. Die Auswirkungen auf GDD₉₅ und FH bei einer Selektion auf GDD₁₅ wird in **Abbildung 1** illustriert. Genotypen mit einem späteren Beginn des Schossens (GDD₁₅) erreichen ihre Endhöhe sukzessive später und werden grösser. Eine Selektion auf Genotypen mit Werten um das 25^{te} und 75^{te} Perzentil für GDD₁₅ resultiert in GDD₉₅- und FH- Werten innerhalb der Variationsspanne, die durch deren Kovarianz mit GDD₁₅ erklärt wird (gelbes Rechteck in **Abbildung 1**). Eine Selektion in den Populationsextremen (< 5% und > 95%; **Abbildung 1**) hingegen übersteigt diese Spanne. Die Selektion der spätesten 5% (> 95%) der Genotypen für GDD₁₅ führt zu einer Selektion auf eine

hohe Endhöhe die spät erreicht wird. Tendenziell sind kürzere Genotypen auch früher (positive Korrelation zwischen GDD_{15} und FH, $R^2 = 26$).

Um kurzfristige genotypische Wachstumsreaktionen auf wechselnde Umweltbedingungen zu untersuchen, wurde für jede Parzelle eine lineare Regression (vgl. Gl. 1) zwischen der Wachstumsrate in jedem einzelnen Messintervall und der mittleren Temperatur sowie dem (VPD) im jeweiligen Intervall gemacht. Obwohl kein signifikanter linearer Zusammenhang festgestellt werden konnte, ergab die Varianzanalyse signifikante ($p < 0.001$) genotypische Effekte mit einer Heritabilität von 0.4 für die Abhängigkeit der Wachstumsrate zur Temperatur und einer Heritabilität von 0.6 für die Abhängigkeit zum VPD.

4 Diskussion

TLS Messungen mit dem auf der FIP installierten Scanner ermöglichte eine hoch präzise Erfassung der Bestandeshöhe. Der Achsenabschnitt der linearen Regression impliziert eine Unterschätzung der Bestandeshöhe gemessen mit TLS von ca. 10% gegenüber den Handmessungen. TLS- und Handmessung konstant ist, kann sie aber einfach korrigiert werden und beeinflusst die Rangordnung unter den Genotypen nicht.

Die Resultate zeigen, dass der FIP-TLS Ansatz geeignet ist, um genotypische Unterschiede im Höhenwachstum in hoher zeitlicher Auflösung zu erfassen. Betreffend Durchsatz ermöglichte das System unter den verwendeten Einstellungen die Bestandeshöhe von 714 Parzellen innerhalb von 3.5 Stunden zu messen.

Weizen zeigt ein lineares Wachstum während der Höhenwachstumsphase

Unsere Resultate zeigen ein lineares Höhenwachstum für fast alle Genotypen zwischen vom Beginn bis zum Ende der Höhenwachstumsphase. Frühere Studien zeigten, dass das Wachstum einzelner Internodien in Weizen (KIRBY 1988) und Mais (FOURNIER & ANDRIEU 2000) einem sigmoiden Trend folgt. Aufgrund unserer Resultate vermuten wir, dass sich die Summe aller sich verlängernden Internodien linear beschreiben lässt. Die Betrachtung der Wachstumsraten zwischen aufeinanderfolgenden Messpunkten zeigt jedoch konsistente Abweichungen zum linearen Trend. Diese könnten eine Reaktion auf fluktuierende Umweltparameter sein. Die Wachstumsreaktion auf Temperatur und VPD, basierend auf den Wachstumsraten zwischen aufeinanderfolgenden Messpunkten zeigten relativ hohe Erblichkeiten, der im zugrundeliegenden Modell angenommene lineare Zusammenhang konnte aber nicht betätigt werden. Es bedarf deshalb weiterer Untersuchungen um diese Frage zu beantworten.

TLS ermöglicht das präzise Messen von drei hoch erblichen Merkmalen

Mittels TLS konnten drei potentiell unabhängige Merkmale quantifiziert werden: i) der Beginn des Höhenwachstums, ii) das Ende des Höhenwachstums und iii) die Endhöhe. Die Dauer des Höhenwachstums wurde hauptsächlich durch die Variation in GDD_{95} beeinflusst, während die Variation in GDD_{15} wenig Einfluss hatte. Diese Unabhängig-

keit zwischen der Dauer des Höhenwachstums und vorhergehender Phasen wurde schon früher gezeigt (WHITECHURCH *et al.* 2007). Unsere Resultate implizieren, dass Variation in GDD₁₅ einen indirekten Einfluss auf GDD₉₅ hat, ohne die Dauer des Höhenwachstums zu beeinflussen

Der Beginn des Höhenwachstums lässt sich nur schwer nicht-destruktiv messen. GDD₁₅ könnte ein nützliches Maß für die Erfassung des Beginns des Höhenwachstums sein. Der Beginn des Schossens ist einer von fünf kritischen Stadien im Weizen, der häufig in Pflanzenmodellen verwendet wird (HOLZKÄMPER *et al.* 2015). Dennoch ist es das einzige der fünf Stadien, das in einem größeren Set von Genotypen schwierig zu erfassen ist. Auflaufen, Dreiblattstadium, Blüte und Reife lassen sich leichterheben. Der Beginn des Höhenwachstums lässt sich jedoch nur destruktiv bestimmen, indem durch Aufschneiden der Pflanze der Zeitpunkt bestimmt wird, wenn der erste Knoten 1 cm über dem Bestockungsknoten ist (PASK *et al.* 2012).

Große Phänotypisierungsanlagen wie FIP eignen sich zur Bestimmung der genetischen Basis komplexer Merkmale, die unter normalen Feldbedingungen schwer zu erheben sind. Da das System stationär ist, ist die Verwendung aber auf eine einzige Umgebung beschränkt. Das limitiert die Anwendbarkeit für Züchtungsbezogene Studien, wo mehrere Umgebungen erwünscht sind. Dennoch zeigen die hohen Heritabilitäten der beobachteten Merkmale über Jahre hinweg, dass es ausreichen könnte, sie in einer begrenzten Anzahl von Jahren oder Umgebungen zu bewerten. Darüber hinaus geht die Drohnen Technologie rasant voran. Die Erfassung der Bestandeshöhe mit Drohnen ist derzeit aus digitalen Bildern sowie aus von Drohnen getragenen, leichten Laserscannern möglich. Die Genauigkeit solcher Messungen könnte im Augenblick noch geringer sein, als die hier präsentierte Auflösung. Allerdings wird die Genauigkeit der Höhenmessung mit Drohnen in naher Zukunft steigen. Dies würde die Anwendung des in dieser Studie vorgeschlagenen Ansatzes in mehreren Umgebungen ermöglichen. So könnte der Zeitpunkt des Beginns und des Endes der des Höhenwachstums in umfangreiche Zuchtprogramme mit geringen Arbeitskosten integriert werden.

Literaturverzeichnis

- ATKINSON D., PORTER J.R. (1996): Temperature, plant development and crop yields. *Trends in Plant Science* 1: 119–124.
- DORNBUSCH T., LORRAIN S., KUZNETSOV D., FORTIER A., LIECHTI R., XENARIOS I., FANKHAUSER C. (2012): Measuring the diurnal pattern of leaf hyponasty and growth in *Arabidopsis* – a novel phenotyping approach using laser scanning. *Functional Plant Biology* 39: 860–869.
- FALCONER D.S., MACKAY T.F. (1996): *Introduction to Quantitative Genetics*. Essex, England: Benjamin Cummings.
- FISCHER R.A. (1985): Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *The Journal of Agricultural Science* 105: 447–461.
- FISCHER R.A. (2011): Wheat physiology: a review of recent developments. *Crop and Pasture Science* 62: 95–114.

- FOURNIER C., ANDRIEU B. (2000):** Dynamics of the Elongation of Internodes in Maize (*Zea mays* L.): Analysis of Phases of Elongation and their Relationships to Phytomer Development. *Annals of Botany* **86**: 551–563.
- FRIEDLI M., KIRCHGESSNER N., GRIEDER C., LIEBISCH F., MANNALE M., WALTER A. (2016):** Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions. *Plant Methods* **12**: 9.
- GONZÁLEZ F.G., SLAFER G.A., MIRALLES D.J. (2003):** Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Research* **81**: 17–27.
- HOLZKÄMPER A., FOSSATI D., HILTBRUNNER J., FUHRER J. (2015):** Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* **15**: 109–122.
- KIRBY E.J.M. (1988):** Analysis of leaf, stem and ear growth in wheat from terminal spikelet stage to anthesis. *Field Crops Research* **18**: 127–140.
- KIRCHGESSNER N., LIEBISCH F., YU K., PFEIFER J., FRIEDLI M., HUND A., WALTER A. (2016):** The ETH field phenotyping platform FIP: a cable-suspended multi-sensor system. *Functional Plant Biology*.
- KOLLERS S., RODEMANN B., LING J., KORZUN V., EBMAYER E., ARGILLIER O., HINZE M., PLIESKE J., KULOSA D., GANAL M.W., ET AL. (2013):** Whole Genome Association Mapping of Fusarium Head Blight Resistance in European Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLOS ONE* **8**: e57500.
- MCMMASTER G.S. (2009):** Development of the Wheat Plant. In: Regentessor BFCE, ed. *Wheat Science and Trade*. Wiley-Blackwell, 31–55.
- MIRALLES D.J., RICHARDS R.A., SLAFER G.A. (2000):** Duration of the stem elongation period influences the number of fertile florets in wheat and barley. *Functional Plant Biology* **27**: 931–940.
- MIRALLES D.J., SLAFER G.A. (2007):** Paper Presented at International Workshop on Increasing Wheat Yield Potential, Cimmyt, Obregon, Mexico, 20-24 March 2006 Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *The Journal of Agricultural Science* **145**: 139–149.
- PASK A.J.D., PIETRAGALLA J., MULLAN D.M., REYNOLDS M.P. (2012):** *Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping*. CIMMYT.
- 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.
- SLAFER G.A., CALDERINI D.F., MIRALLES D.J. (1996):** Yield components and compensations in wheat: opportunities for further increasing yield potential. In: Reynolds MP., In: Rajaram S., In: McNab A, eds. *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers: Proceedings of a Workshop Held in Ciudad Obregón, Sonora, Mexico*. Mexico: CIMMYT, 101–133.
- SLAFER G.A., KANTOLIC A.G., APPENDINO M.L., MIRALLES D.J., SAVIN R. (2009):** Chapter 12 - Crop Development: Genetic Control, Environmental Modulation and Relevance for Genetic Improvement of Crop Yield. In: Sadras V., In: Calderini D, eds. *Crop Physiology*. San Diego: Academic Press, 277–308.
- WALTER A., LIEBISCH F., HUND A. (2015):** Plant phenotyping: from bean weighing to image analysis. *Plant Methods* **11**: 1–11.
- WHITECHURCH E.M., SLAFER G.A., MIRALLES D.J. (2007):** Variability in the Duration of Stem Elongation in Wheat and Barley Genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science* **193**: 138–145.

Hocheffiziente Analyse hyperspektraler Bildzeitreihen zur Detektion und Charakterisierung von Pflanzenkrankheiten

High efficient analysis of hyperspectral image time series for the detection and characterization of plant diseases

Jan Behmann¹, David Bohnenkamp¹, Matheus Kuska¹, Stefan Thomas¹, Mirwaes Wahabzada², Christoph Römer³, Peter Schmitter³, Lutz Plümer³, Anne-Katrin Mahlein¹

¹ *Institut für Nutzpflanzenwissenschaft und Ressourcenschutz-Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Universität Bonn, Deutschland*

² *Bayer AG, Deutschland*

³ *Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn, Deutschland*

E-Mail: jbehmann@uni-bonn.de

Zusammenfassung: Pflanzenkrankheiten haben einen signifikanten Einfluss auf Erträge landwirtschaftlicher Kulturen. Für eine effiziente Kontrolle von Pflanzenkrankheiten ist eine frühzeitige Detektion und zuverlässige Identifikation der Schadursache entscheidend. Symptome als Folge einer Infektion mit einem Pathogen gehen mit spezifischen Änderungen der Reflektanzeigenschaften einher. Diese können nicht-invasiv durch optische Sensoren erfasst werden. Hyperspektralkameras erfassen hierbei Pflanzen spektral und räumlich hochaufgelöst, erzeugen jedoch umfangreiche Datenmengen die viele verbreitete Verfahren der Datenanalyse und Modellierung herausfordern.

Um das Potential dieser Sensordaten besser auszunutzen, sind neue Ansätze der Datenanalyse erforderlich. Geeignete Algorithmen des Maschinellen Lernens sind vielfach frei verfügbar. Um jedoch eine effiziente und explorative Datenanalyse zu realisieren, müssen diese in einem kontinuierlichen Datenfluss integriert werden. Das Programm HSVaP („*Hyperspectral Visualization and Processing*“) kombiniert Visualisierung, Lernverfahren und Modellvalidierung in einer grafischen Oberfläche. Als Open-Source Programm kann es einen Beitrag dazu leisten komplexe Sensordaten effizienter zu analysieren und damit die Etablierung hyperspektraler Sensoren in verschiedenen landwirtschaftlichen Anwendungsgebieten zu unterstützen.

Deskriptoren: Hyperspektrale Kameras, Datenanalyse, Klassifikation, Pflanzenkrankheiten

Abstract: *Plant diseases have a significant impact on the global agricultural yield. For a resource efficient management of plant diseases, early detection and reliable identification of the pathogen is decisive. Symptoms as the result of an infection by a pathogen cause specific changes in plant reflectance. These can be measured non-invasively by*

optical sensors. Hyperspectral cameras capture the reflectance of plants in high spectral and spatial resolution, but they generate high amounts of data which challenge established data analysis methods.

For a better understanding and interpretation of the data's potential, new data analysis methods are required. Suitable methods are freely available, but for an efficient realization of an explorative data analysis, they need to be integrated in a continuous workflow. The Software HSVaP („Hyperspectral Visualization and Processing“) combines visualization, machine learning methods and model validation in a graphical user interface. As open-source software it has the potential to support hyperspectral sensors by lowering the initial hurdle.

Keywords: *Hyperspectral cameras, data analysis, classification, plant diseases*

1 Einleitung

Eine akkurate und frühzeitige Diagnose von Pflanzenkrankheiten ist essentiell um geeignete Gegenmaßnahmen zur richtigen Zeit und am richtigen Ort einzuleiten. Bestenfalls umfasst diese Diagnose die Position von primären Befallsherden, den Krankheitsfortschritt und insbesondere den Typ des Schaderregers.

Viele Pflanzenkrankheiten beeinflussen die Reflektanzeigenschaften von Pflanzen in charakteristischer Weise (MAHLEIN *et al.* 2012). Je nach spektralen Bereich wird dies durch die Einlagerung bzw. dem Abbau von Pigmenten, Änderungen in Wassergehalt oder Zellstruktur in Folge der Symptomausprägung verursacht. Pigmente beeinflussen das Spektrum insbesondere im sichtbaren Bereich (400nm-600nm), wohingegen die Zellstruktur in erster Linie das Signal im nahen Infrarot-Bereich (600nm-1000nm) dominiert (JENSEN 2009). Im kurzwelligen Infrarotbereich (1000nm-2500nm) liegen mehrere sogenannte Wasserbande, in denen ein Großteil der elektro-magnetischen Strahlung durch das Wasser im Blatt absorbiert wird (ELVIDGE 1990).

Hyperspektrale Kameras sind in der Lage diese Reflektanzeigenschaften in einem weiten Spektralbereich räumlich und spektral hoch-aufgelöst zu erfassen. Die erfassbare Information geht dabei deutlich über den für das menschliche Auge sichtbaren Bereich hinaus, insbesondere der nahe und kurzwellige Infrarotbereich können erfasst werden. Optische Sensoren messen in kürzester Zeit enorme Datenmengen die selbst aktuelle, leistungsfähige Computer und etablierte Verfahren der Datenanalyse an ihre Grenzen bringen (BEHMANN *et al.* 2015).

Hier ermöglichen *State-of-the-Art-Methoden* des Maschinellen Lernens eine exakte Charakterisierung des Krankheitsverlaufs und eine Detektion bzw. Identifikation von Krankheiten, teilweise bevor diese für das Auge sichtbar sind (RUMPF *et al.* 2010, KUSKA *et al.* 2015, ROSCHER *et al.* 2016). Aktuell erschweren jedoch sowohl der komplexe Zugang zu den Algorithmen als auch der Bedarf an repräsentativen Trainingsdaten die

Anwendung Maschinellem Lernverfahren und Data-Mining Methoden für die Analyse hyperspektraler Bilder.

2 Analyse hyperspektraler Datensätze auf verschiedenen Skalen

Im folgenden Abschnitt werden beispielhafte Anwendung von Methoden des Maschinellen Lernens im Kontext der Krankheitserkennung mit Hilfe hyperspektraler Kameras vorgestellt. Die Beobachtungen erfolgten dabei auf drei unterschiedlichen Skalen: mikroskopische Aufnahmen von Blattausschnitten, Messungen ganzer Blätter und die Erfassung von Bestandesoberflächen.

Auf der **mikroskopischen Ebene** wurden Ausschnitte einzelner Gerstenblätter mit unterschiedlicher Anfälligkeit nach Inokulation mit Echten Mehltau, hyperspektral beobachtet (KUSKA *et al.* 2015). Die hohe räumliche Auflösung von bis zu $7,5\mu\text{m}$ ermöglichte dabei eine Erfassung subtiler Abwehrreaktionen von Pflanzen. Zur Bestimmung von befallenen Gewebe und Blattbereichen und zur visuellen Abstraktion der spektralen Dynamik im zeitlichen Verlauf wurde ein unüberwachtes Verfahren der Matrixfaktorisierung, die „Simplex Volume Maximization“ angewendet (THURAU *et al.* 2010). Dabei werden einzelne Pixel als Linearkombination von Extrempunkten, den sogenannten Archetypen neu parametrisiert. Mit dieser Methode konnten die verschiedenen Interaktionstypen der Gerste frühzeitig differenziert werden. Kombiniert wurde dieser Ansatz mit Isomaps, einem Verfahren zur Dimensionsreduktion, um nun die Entwicklung der Pflanzen in der 2D-Ebene zu visualisieren (**Abbildung 1**).

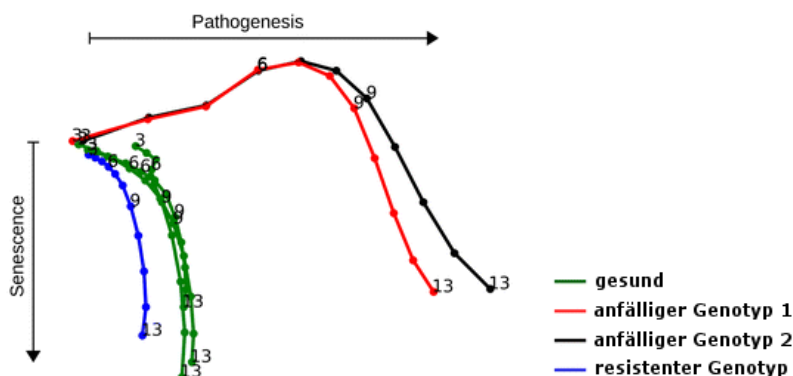


Abbildung 1: Hyperspektrale Dynamik verschiedener Interaktionstypen Gerste vs. Echter Mehltau, dargestellt in Traces durch Kombination von Simplex Volume Maximization und Isomaps (aus KUSKA *et al.* 2015).

Auf **Blattebene** konnten Symptome von Braunrost an Weizen, basierend auf annotierten Trainingsdaten durch eine überwachte Klassifikation Pixel-genau identifiziert werden. Zeitreihendaten ermöglichen auf dieser Weise die Erfassung der Dynamik der Symptomentwicklung (**Abbildung 2**) und die Identifikation von relevanten Zeitpunkten während der Pathogenese. Die Dynamik der Symptomentwicklung stellt dabei eine

Kombination aus Wirt-Pathogen-Interaktion und den Umweltbedingungen dar und ist nicht invasiv ableitbar.

Auf **Bestandsebene** wurden Experimente in einer MiniPlot-Anlage im Gewächshaus, Campus Klein-Altendorf unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Innerhalb dieser MiniPlots mit einem Volumen von 535 Litern (Innenmaße 111x71x61 cm) konnte durch Bepflanzung mit je 360 Gerstenpflanzen eine Bestandesoberfläche nachgebildet werden. Die Änderungen der Reflektanzeigenschaften dieser Bestandesoberfläche unter Einfluss von Echtem Mehltau, wurden mit einer Hyperspektralkamera im Bereich von 400nm-1000nm erfasst. Die Beleuchtung erfolgte durch eine Kombination von Halogenlampen und der natürlichen Beleuchtung die das Gewächshausdach durchdringt. Ziel der Datenanalyse ist hier eine quantitative Abschätzung des Befallsgrades der Pflanze als Hinweis auf die Anfälligkeit unterschiedlicher Sorten. Durch die Anwendung einer One-Class-SVM wurden die von gesunden Bereichen abweichenden Pixel selektiert und eine Quantifizierung des Befallsgrades ermöglicht (**Abbildung 2**).

Diese beispielhaften Anwendungen Maschinelles Lernverfahren für die Analyse hyperspektraler Bilddaten zeigt einerseits das Potential, darüber hinaus jedoch auch die Breite der Anwendungsgebiete für derartige Verfahren im Bereich Krankheitsdetektion.

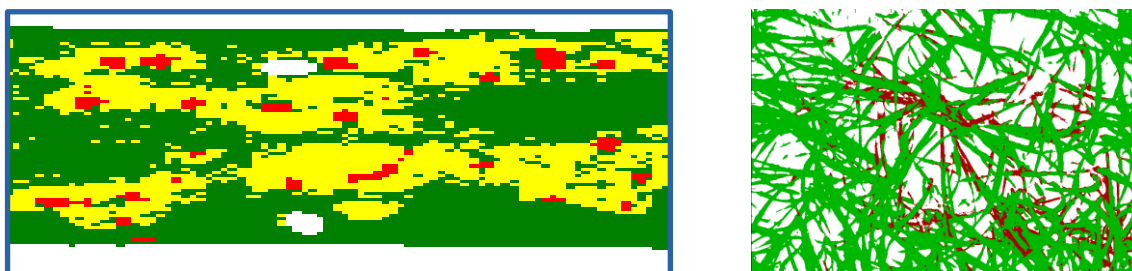


Abbildung 2: Klassifikationsergebnis für die Detektion von Krankheitssymptomen. Links: Detektion von chlorotischem Gewebe (gelb), Sporenlager (rot) und gesundem Blattgewebe (grün) in Folge von Braunrostbefall an Weizenblättern (12 Tage nach Inokulation). Rechts: One-Class Klassifikation für die Detektion von Echtem Mehltau an Gerste auf Bestandsebene (14 Tage nach Inokulation)

3 HSVaP

In dieser Studie wurden Ansätze zur effizienten Analyse von hyperspektralen Pflanzendaten aufgezeigt. Um einen einfachen Zugang zu den einzelnen Analyseverfahren zu ermöglichen, wurde eine über eine grafische Benutzerschnittstelle bedienbare Software entwickelt. Diese Software – *HSVaP* („*Hyperspectral Visualization and Processing*“) – integriert sowohl überwachte als auch unüberwachte Lernverfahren, wie z.B. *K-Means Clustering* und *Support Vector Machine* Klassifikation. Sie ermöglicht darüber hinaus eine effiziente Generierung von Trainingsdaten. Dazu werden zeitgleich der räumliche Kontext und die spektralen Eigenschaften visualisiert, sodass auch für Nicht-Experten eine zuverlässige Annotation möglich wird. Auch die häufige Fragestellung nach rele-

vanten Bereichen des Spektrums für die jeweilige Klassifikationsaufgabe kann durch eine Reihe von Merkmalsselektionsalgorithmen adressiert werden. Die integrierten Verfahren ermöglichen die effiziente Bearbeitung einer Vielzahl von Fragestellungen im Kontext hyperspektraler Bilder von Pflanzen. Die jeweils aktuelle Programmversion gibt es auf Anfrage an jbehmann@uni-bonn.de.

Algorithmen

In der aktuellen Version 0.9 bindet HSVaP (**Abbildung 3**) in drei verschiedenen Bereichen Algorithmen des Maschinellen Lernens ein: zum unüberwachten Clustering, zur überwachten Klassifikation und zur überwachten Merkmalsselektion (siehe auch BEHMANN *et al.* 2015).

Beim Clustering wird das Hyperspektralbild ausschließlich basierend auf Eigenschaften der Daten, pixelweise einer festgelegten Anzahl von Clustern zugeordnet. Dieser Ansatz eignet sich gut, wenn visuell schwer trennbare Bereiche des Bildes segmentiert werden sollen oder ein Überblick über die unterschiedlichen Komponenten im Bild von Interesse ist. Als Verfahren ist der K-Means Algorithmus integriert (LLOYD 1982). Dieser Algorithmus findet iterativ Bereiche im Merkmalsraum mit hoher Datendichte, repräsentiert diese mittels ihres Mittelwertes und ordnet alle Datenpunkte nach dem nächsten-Nachbarn-Verfahren diesen zu.

Als Verfahren zur überwachten Klassifikation wurden Support Vektor Maschinen (SVM; CORTES & VAPNIK 1995) integriert. Basierend auf annotierten Trainingsdaten wird ein Klassifikationsmodell bestimmt, welches auf Testdaten angewendet werden kann. Dieses Verfahren eignet sich gut für die Analyse hyperspektraler Daten, da die SVM auch in sehr hochdimensionalen Räumen bei wenigen Trainingsdaten gute Ergebnisse erzielen. Diese Eigenschaft ist eng verknüpft mit der Optimierungsfunktion der SVM, die auf einer Maximierung der Breite des Margins basiert. Der Margin bezeichnet im Merkmalsraum den Bereich um die Trennfunktion, der nicht von Daten belegt ist (**Abbildung 4**). Die Komplexität der resultierenden Trennfunktion ist dabei abhängig von der gewählten Distanzfunktion. Das Skalarprodukt als linearer Kernel ist verknüpft mit der linearen Trennfunktion, wohingegen radiale Basisfunktionen („RBF-Kernel“) beliebig komplexe, nicht-lineare Funktionen generieren können. Integriert in die Benutzeroberfläche ist eine Routine zur Optimierung der benötigten Hyperparameter, z.B. dem Cost-Parameter C, der den Einfluss von Ausreißern kontrolliert.

Das Programm kann diese Verfahren zum unüberwachten und überwachten Lernen auf Spektren anwenden, integriert jedoch auch Methoden, die durch eine Auswahl bzw. Kombination von Merkmalen eine kompaktere und ggf. auch informativere Datenrepräsentation zu ermöglichen. Unterschieden wird dabei zwischen Verfahren der Merkmalsselektion, die einzelne Merkmale anhand ihrer Relevanz für die gegebene Fragestellung bewerten und der Berechnung von etablierten Vegetationsindizes. Zur Berechnung der Relevanz einzelner Bänder können im HSVaP die Verfahren Relief (ROBNIK-ŠIKONJA &

KONONENKO 2003), InformationGain (KULLBACK & LEIBLER 1951), und SVM genutzt werden. Auf eine ausführlichere Darstellung der Verfahren wird an dieser Stelle verzichtet.

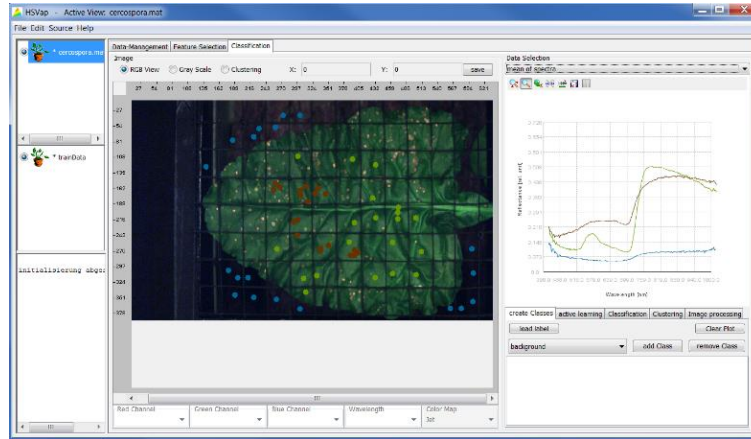


Abbildung 3: Annotations-Ansicht von HSVaP eines Zuckerrübenblattes mit Cercospora Blattflecken. Annotiert sind Pixel für die Klassen Hintergrund, gesundes Blattgewebe und Blattflecken

Alle integrierten Lernverfahren stehen als Bestandteil verschiedener Toolboxen unter Open-Source Software-Lizenzen zur freien Verfügung. In diesem Kontext erschwert jedoch das Handling der Daten, die Annotation und die geeignete Parameterselktion häufig eine Analyse hyperspektraler Bilder. Somit stellt die Zusammenführung verschiedener Algorithmen unter einer, an die besonderen Anforderungen der Analyse hyperspektraler Bilder im Nahbereich angepassten Benutzeroberfläche, einen signifikanten Mehrwert dar.

Die Benutzeroberfläche gliedert sich in drei Ansichten: „Data Management“, „Feature Selection“ und „Classification“. In allen drei Ansichten sind die Übersicht der geladenen Datensätze und der aktuell aktive Datensatz sichtbar.

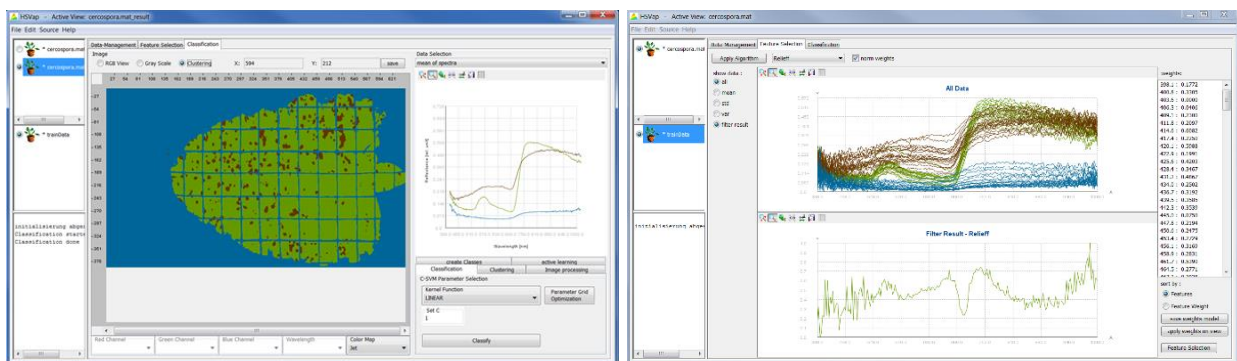


Abbildung 4: Links: Die resultierende Klassifikation aus **Abbildung 3** durch den Klassifikator Support Vektor Maschine (SVM). Rechts: Die Anwendung des Relieff-Verfahrens zur Merkmalsgewichtung angewendet auf die Trainingsdaten.

Datenformate und Analyseframeworks

Für Anwendbarkeit und Integration in vorhandene Workflows ist die Fähigkeit verschiedene Datenformate zu importieren und zu exportieren relevant. HSVaP ist in der Lage das binäre ENVI-Format (Header-Datei mit Binär-Datei) und entsprechend formatierte Matlab-Dateien (*.mat) zu importieren. Exportiert werden können das ENVI-Format, Matlab-Formate und txt-Dateien. Letzteres zielt auf den Import in einer Tabellenkalkulation für eine spezifische statistische Analyse, die nicht von HSVaP abgedeckt wird. Die verwendeten Algorithmen (K-Means, SVM, Relief) entstammen dem etablierten Weka-Framework für Maschinelles Lernen (FRANK *et al.* 2004).

4 Ergebnisse und Diskussion

Das Potential der hyperspektralen Sensorik für die Detektion und Erfassung von Pflanzenkrankheiten auf verschiedenen Skalen wurde in verschiedenen Experimenten untersucht und aufgezeigt. Auf der mikroskopischen Skala ist die Differenzierung verschiedener Abwehrreaktionen möglich. Auf der Blattskala ist die Erfassung der spektralen Dynamik der Symptomausprägung möglich. Auf Skala des Bestandes ist die Anfälligkeit verschiedener Sorten quantifizierbar und ermöglicht somit eine wichtige Informationsquelle für die Züchtung resistenter Sorten.

Um derartige Untersuchungen in angemessener Zeit durchführen zu können, wurde mit HSVaP eine Software entwickelt, die relevante Werkzeuge für die Analyse hyperspektraler Bilddaten unter einer grafischen Oberfläche zusammenführt. Da die geringe Nutzeranzahl der hyperspektralen Technologie auch heute noch ein rasches Ausschöpfen des vollen Potentials erschwert, wurde HSVaP als Open-Source Software konzipiert. In Verbindung mit neuen Initiativen zur Bereitstellung hyperspektraler Datensätze und der wachsenden Verbreitung von Snapshot-Multispektralkameras kann dies dazu beitragen, die dynamische Entwicklung hyperspektraler Sensorik und Auswerteverfahren zu unterstützen.

Literaturverzeichnis

- BEHMANN J., MAHLEIN A.K., RUMPF T., RÖMER C., PLÜMER L. (2015):** A review of advanced machine learning methods for the detection of biotic stress in precision crop protection. *Precision Agriculture*, 16(3), 239-260.
- CORTES C., VAPNIK V. (1995):** Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), 273-297.
- ELVIDGE C.D. (1990):** Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Remote Sensing*, 11(10), 1775-1795.
- FRANK E., HALL M., TRIGG L., HOLMES G., WITTEN I.H. (2004):** Data mining in bioinformatics using Weka. *Bioinformatics*, 20(15), 2479-2481.
- JENSEN J.R. (2009):** *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.* Prentice Hall.

- KULLBACK S., LEIBLER R.A. (1951):** On information and sufficiency. The annals of mathematical statistics, 22(1), 79-86.
- KUSKA M., WAHABZADA M., LEUCKER M., DEHNE H.W., KERSTING K., OERKE E.C., STEINER U. MAHLEIN A.K. (2015):** Hyperspectral phenotyping on the microscopic scale: towards automated characterization of plant-pathogen interactions. Plant Methods, 11(1), 28.
- LLOYD S. (1982):** Least squares quantization in PCM. IEEE Transactions on information theory, 28(2), 129-137.
- MAHLEIN A.K., STEINER U., HILLNHÜTTER C., DEHNE H.W., OERKE E.C. (2012):** Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. Plant methods, 8(1), 3.
- ROBNIK-ŠIKONJA M., KONONENKO I. (2003):** Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. Machine learning, 53(1-2), 23-69.
- ROSCHER R., BEHMANN J., MAHLEIN A.-K., DUPUIS J., KUHLMANN H., PLÜMER L. (2016):** Detection of Disease Symptoms on Hyperspectral 3d Plant Models. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 89-96.
- RUMPF T., MAHLEIN A.K., STEINER U., OERKE E.C., DEHNE H.W., PLÜMER L. (2010):** Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. Computers and Electronics in Agriculture, 74(1), 91-99.
- THURAU C., KERSTING K., BAUCKHAGE C. (2010):** Yes we can: simplex volume maximization for descriptive web-scale matrix factorization. In Proceedings of the 19th ACM international conference on Information and knowledge management, pp. 1785-1788.

Nicht-invasive Detektion von Echem Mehltau der Gerste auf Blatt- und Bestandesebene mittels hochaufgelösten hyperspektralen Aufnahmen und modernen Analysemethoden

Non-invasive detection of barley powdery mildew on the leaf and canopy level through hyperspectral images and modern data analysis methods

Stefan Thomas^{1,2}, Jan Behmann¹, Mirwaes Wahabzada³, Uwe Rascher², Anne-Katrin Mahlein¹

¹ *Institut für Nutzpflanzenwissenschaft und Ressourcenschutz-Phytomedizin, Universität Bonn, Bonn*

² *Institut für Bio- und Geowissenschaften, IBG-2: Pflanzenwissenschaften, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich*

³ *Bayer AG, Deutschland*

E-Mail: stefan.thomas@uni-bonn.de

Zusammenfassung: Die Züchtung resistenter Sorten ist ein entscheidendes Element zur Ertragsicherung bei Nutzpflanzen. Die Phänotypisierung von selektierten Genotypen ist dabei ein zeit- und kostenintensiver Schritt bei der Entwicklung neuer Getreidesorten. Hyperspektrale bildgebende Verfahren bieten die Möglichkeit die Phänotypisierung effizienter zu gestalten. Es wurde bereits in verschiedenen Studien gezeigt, dass die Detektion von Krankheiten und Resistenzreaktionen mittels hyperspektralen Sensoren möglich ist. Die aktuelle Arbeit baut auf diesen Erkenntnissen auf und untersucht zum einen den möglichen Nutzen von bildgebender Transmissionsmessung in Kombination mit Reflexionsmessung unter kontrollierten Bedingungen auf Blattebene. Zum anderen wurde die Möglichkeit der praktischen Anwendung hyperspektraler bildgebender Verfahren mittels Hochdurchsatzverfahren auf Bestandesebene untersucht.

Deskriptoren: Hyperspektrale bildgebende Verfahren, Pflanzenkrankheiten, Transmission, Blatt und Bestandesebene, Phänotypisierung, Hochdurchsatz.

Abstract: *The breeding of resistant cultivars is an important element in safeguarding agricultural plant production. Hereby the process of phenotyping is time and cost expensive. Hyperspectral imaging has the possibility to speed up the process of phenotyping. Multiple studies showed that hyperspectral sensors are able to detect plant disease symptoms and resistance reactions.*

In this study the possible use of imaging transmission measurement in addition to the established resistance measurement is evaluated under controlled conditions on leaf

scale. Furthermore the possibility of practical applications of hyperspectral imaging was investigated via high throughput measurements on canopy scale.

Keywords: Hyperspectral imaging, plant diseases, transmission, leaf and canopy scale, phenotyping, high throughput.

1 Einleitung

Echter Mehltau führt jährlich zu erheblichen Ertragsverlusten in der Gerstenproduktion, welche hauptsächlich durch den Anbau resistenter Gerstensorten verhindert werden. Die Phänotypisierung ist hierbei ein entscheidendes Element in der Entwicklung resistenter Gerstensorten. Die Phänotypisierung, d.h. die Bewertung der Genotyp-Umwelt Interaktion, ist allerdings innerhalb des Züchtungsvorgangs resistenter Sorten der aufwändigste Prozess (FURBANK & TESTER 2011).

Hyperspektrale bildgebende Verfahren sind im Gegensatz zu klassischen, visuellen Verfahren in der Phänotypisierung sowohl nicht-invasiv, als auch objektiv. Mehrere Studien konnten belegen, dass Krankheitsbefall von Pflanzen mittels hyperspektraler Bilddaten detektiert und identifiziert werden kann (HILLNHÜTTER *et al.* 2012, ZHAO *et al.* 2016). Im Gegensatz zu RGB Bildern erfassen hyperspektrale Aufnahmen einen weiten spektralen Bereich im elektromagnetischen Spektrum bis hin in das kurzwellige Infrarot. Durch die Erfassung des reflektierten Lichtes von Pflanzen kann man Änderungen in der Oberflächenstruktur der Pflanze und in der chemischen Zusammensetzung des Gewebes ableiten und somit Rückschlüsse auf Veränderungen physiologischer Parameter von Pflanzen während einer Pathogen-Infektion ziehen (BOCK *et al.* 2010, MAHLEIN *et al.* 2012). Somit bieten hyperspektrale Messverfahren eine Möglichkeit den Zustand von Pflanzen und deren Interaktion mit Stressursachen präzise zu beschreiben. Für einen praktischen Einsatz hyperspektraler, bildgebender Verfahren in Phänotypisierungsvorgängen ist es allerdings erforderlich den Durchsatz von Messungen zu erhöhen. Zusätzlich muss eine hohe Genauigkeit bei der Detektion und Bestimmung von Schadursachen auf unterschiedlichen Skalenebenen gewährleistet werden.

In dieser Studie wurde die Möglichkeit zur Bestimmung der Befallsstärke auf Blattebene mittels simultaner Messung von Reflexion und Transmission mit Echten Mehltau infizierter Gerstenpflanzen untersucht. Anschließend wurden moderne Datenanalysemethoden angewandt um eine semi-automatische Auswertung und Interpretation hyperspektraler Bilddaten zu ermöglichen. Die Ergebnisse der Versuche belegen, dass eine Bestimmung der Befallsstärke auf Blattebene mittels reflexionsbasierten, hyperspektralen Bildern möglich ist und konnten mit Erkenntnissen aus molekularbiologischen Methoden verifiziert werden (THOMAS *et al.* 2016).

Daraufhin wurde ein Gewächshaus-basiertes hyperspektrales Phänotypisierungssystem zum Zweck der Hochdurchsatz Messungen auf Bestandsebene entwickelt, welches zur praktischen Anwendung im Bereich der Phänotypisierung im Prozess der Resistenzzüchtung verwendet werden kann.

2 Material und Methoden

Pflanzen Anzucht und Pathogen-Inokulation

Die Anzucht und Inokulation der Gerstenpflanzen für die Versuche auf Blattebene erfolgten gemäß THOMAS *et al.* (2016).

Für die Versuche auf Bestandesebene wurden sechs Gerstensorten mit unterschiedlicher Anfälligkeit gemäß Bundessortenliste gegenüber Echtem Mehltau (Eileen, Irina (Anfälligkeit 2); Gesine, Milford (Anfälligkeit 4); Tocada, Grace (Anfälligkeit 7)) unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus angezogen. Die Pflanzen wurden in sogenannten „MiniPlots“ zu je 360 Samen pro MiniPlot ausgesät. In den Versuchen wurde pro Sorte ein MiniPlot mit echtem Mehltau inokuliert, während ein weiterer MiniPlot mit Fungizid Vegas (aktiver Wirkstoff 53.1gL^{-1} Cyflufenamid, BASF) behandelt und nicht inokuliert wurde.

Hyperspektrale, bildgebende Erfassung von Reflexion und Transmission auf Blattebene

Die gleichzeitige Messung von Reflexion und Transmission auf Blattebene erfolgte mittels des HyperArt Systems (BERGSTRÄSSER *et al.* 2015, THOMAS *et al.* 2016, Patentnummer: DE 102 012 005 477). Je sechs inokulierte und Kontrollpflanzen wurden in einer Zeitreihe von 11 Tagen gemessen. Die Messungen erfolgten wie in Thomas *et al.* 2016 beschrieben mit einem spektralen Messbereich von 400 – 1000 nm.

Hyperspektrale, bildgebende Erfassung von Reflexion auf Bestandesebene im Hochdurchsatz

Die hyperspektralen Aufnahmen wurden mit dem Kamerasystem ImSpector V10E (400 – 1000 nm; Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) in einer abgedunkelten Messeinrichtung erfasst. Diese wurde mittels eines Schienensystems automatisiert über die einzelnen MiniPlots bewegt. Da es sich bei dem hyperspektralen Sensor um einen Linescanner handelt wurde ein beweglicher Spiegel verwendet, um räumlich aufgelöste Aufnahmen der Plots zu ermöglichen. Der Messabstand zwischen Kamera und Bestand betrug 80 cm, woraus eine räumliche Auflösung von $\sim 0,3$ mm pro Pixel resultiert. Pro Messung wurde ein Abgleich mit einer Weißreferenz durchgeführt, sowie der Dunkelstrom der Kamera für Weißreferenz und Ziel gemessen. Es wurde über einen Zeitraum von 30 Tagen 2-4 tällig gemessen.

Datenanalyse

Die erfassten Daten wurden in beiden Versuchen mittels der Software ENVI normalisiert und ausgewertet (THOMAS *et al.* 2016). Zusätzlich wurden moderne Datenanalyse Methoden verwendet (Hauptkomponentenanalyse, Simplex Volume Maximization) um Krankheitssymptome zuzuordnen und zu quantifizieren (THURAU *et al.* 2012). Die Simp-

lex Volume Maximization (SiVM) verwendet die Extremwerte der Spektren in den gemessenen Daten als sogenannte Archetypen. Jeder Pixel der hyperspektralen Aufnahme wird dann als Linearkombination der einzelnen Archetypen charakterisiert. Dies ermöglicht eine gezielte Dimensionsreduktion und Reparametrisierung des Datensatzes.

3 Ergebnisse

Der Nutzen hyperspektraler Aufnahmen wurde durch Zeitreihenmessungen von Blättern von nahe-isogenen Gerstenlinien nach Inokulation mit *Blumeria graminis* f.sp. *hordei*, dem Erreger des Echten Mehltaus, untersucht (THOMAS *et al.* 2016). Durch eine Hauptkomponentenanalyse der spektral aufgelösten Reflexions- und Transmissionsdaten konnten die verschiedenen Genotypen differenziert werden. Anhand der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse wurde ein Schwellwert für die Identifizierung von Pixeln mit Mehltausymptomen erstellt, welcher eine automatische Detektion der befallenen Stellen ermöglicht (siehe THOMAS *et al.* 2016, Figure 7). Hierbei zeigte sich, dass reflexionsbasierte Messungen im Falle der Detektion von Symptomen des Echten Mehltaus die gleichzeitig aufgenommenen transmissionsbasierten Messungen an Effektivität übertreffen. Eine Kombination von Reflexions- und Transmissionsdaten verbessert die Unterscheidung von Symptomen des Echten Mehltaus und spontanen Nekrosen auf resistenten Genotypen (THOMAS *et al.* 2016). Weiterhin konnte die Befallsstärke auf Blattebene ermittelt und mit Ergebnissen molekulargenetischer Analysen und visuellen Bonituren verglichen werden (Siehe THOMAS *et al.* 2016, Figure 2 und 3).

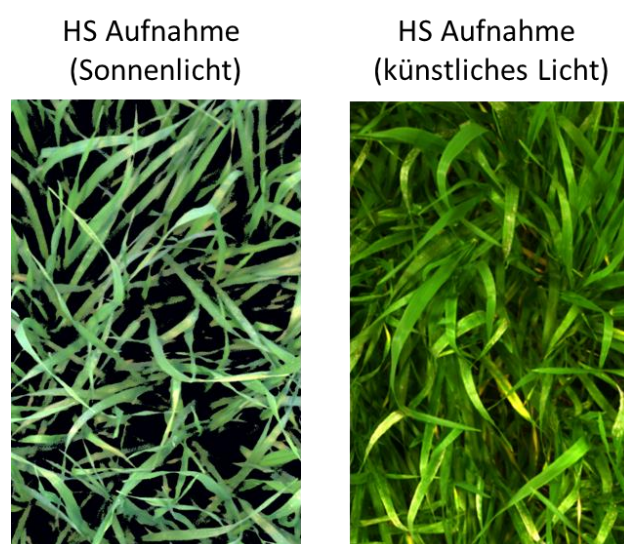


Abbildung 1: Pseudo RGB Darstellungen von hyperspektralen Aufnahmen unter natürlichen und kontrollierten Lichtbedingungen. Das künstliche Licht fällt im etablierten Phänotypisierungssystem diffus und vertikal auf die gemessenen Pflanzen.

Im nächsten Schritt wurde ein hyperspektraler Messaufbau für den Gewächshauseinsatz entwickelt. Mit dem Aufbau wurden sechs Gerstensorten mit unterschiedlicher Anfälligkeit gegenüber Echtem Mehltau in Zeitreihenmessungen 0-30 Tage nach Inokulation mit einem Durchsatz von 1440 Pflanzen pro Stunde nicht-invasiv gemessen. Da durch künstliche Lichtquellen unter Ausschluss des Umgebungslichts eine gleichmäßige, diffuse Beleuchtung von oben erzeugt wurde, konnte die Bildqualität erheblich verbessert werden (**Abbildung 1**). Weiterhin konnten die Auswirkungen der Architektur der Pflanzen, sowie Schattenwurf und Effekte der verschiedenen Blattwinkel minimiert werden. (**Abbildung 1**). Durch die Größe der Bilddaten (zirka 2 GB pro Bild / 260 GB insgesamt) stellten die Auswertung und Handhabung der Daten eine weitere Herausforderung dar. Um diese zu bewältigen, wurde aus der Datenmenge zuerst mittels einer effizienten Methode zur Matrix-Faktorisierung, Simplex Volume Maximization, eine neue Repräsentation der Daten berechnet (zirka 450 MB pro Bild / 62 GB insgesamt). Dies bietet eine neue Verteilung der Daten anhand der errechneten Archetypen, welche bereits für eine erste Klassifizierung der verschiedenen Sorten verwendet werden kann (**Abbildung 2**). Die so bestimmte Befallsstärke beruht auf Symptomen des Echten Mehltaus in späten Stadien (Siehe auch **Abbildung 2**) und weicht daher von der visuellen Bonitur ab. Sie erlaubt allerdings bereits eine Unterscheidung der Sorten anhand der tatsächlichen Befallssituation (**Tabelle 1**).

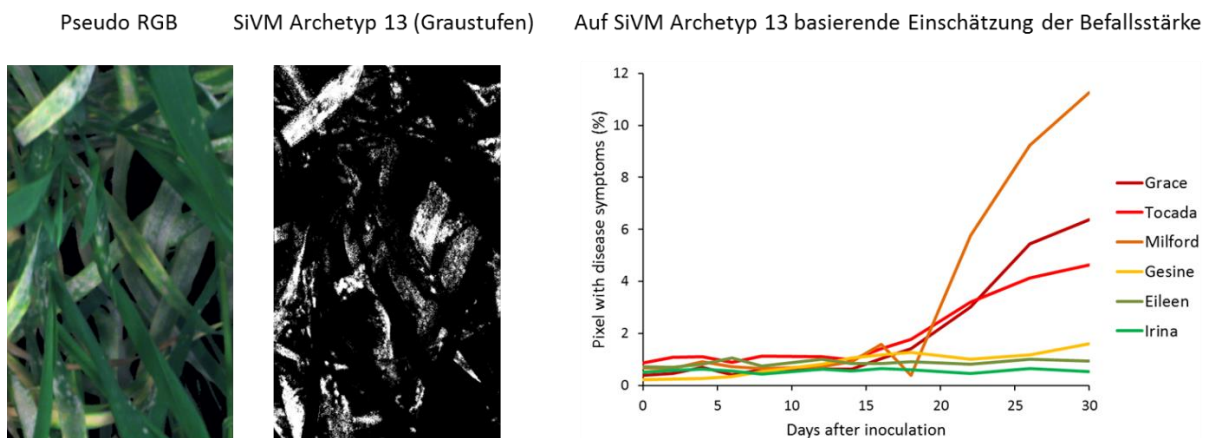


Abbildung 2: Einschätzung der Befallsstärke der verschiedenen Sorten über Archetyp 13 der Simplex Volume Maximization.

Tabelle 1: Visuelle Bestimmung der Befallsstärke der verschiedenen Sorten im MiniPlot Versuch (dai = Tage nach Inokulation).

Sorte	Anfälligkeit gegenüber Echten Mehltau (Bundessorten Liste)	Befallsstärke (Visuelle Bonitur, 26 dai, %)	Erste Symptome sichtbar (2016, dai)
Grace	7	60	8**, 12
Tocada	7	45	12
Milford	4	55	8**, 12
Gesine	4	20	22
Eileen	2	10	14
Irina	2	0 (necrotic lesions visible)	-

4 Diskussion

Die Experimente auf Blattebene zeigen, dass es möglich ist mittels hyperspektraler, bildgebender Sensoren die Befallsstärke von Echten Mehltau auf Gerste zu bestimmen. Dies trifft vor allem auf reflexionsbasierten Daten zu, während eine genaue Bestimmung mittels transmissionsbasierten Daten nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchführbar war. Allerdings zeigen weitere Studien, dass die Messung der Transmission für die Detektion und Klassifikation von invasiveren Stresssymptomen in Abhängigkeit von der Schadursache geeignet ist (BERGSTRÄSSER *et al.* 2015, THOMAS *et al.* 2016).

Aufgrund der Ergebnisse des Versuchs wurde ein reflexionbasiertes, hyperspektrales Messsystem im Gewächshaus etabliert. Zum einen wurde ein höherer Durchsatz unter realistischen Bedingungen zur Phänotypisierung erreicht, zum anderen eine Übertragung der Ergebnisse auf die Bestandsebene. Hierbei haben zusätzliche Faktoren einen Einfluss auf die hyperspektralen Daten. Insbesondere die vorhandenen Umweltbedingungen sowie die komplexe Architektur erektophiler Pflanzenbestände stellen eine Herausforderung bei Messablauf und Interpretation der Daten dar. Trotz der Schwierigkeiten war es möglich einen Durchsatz von 1440 Pflanzen pro Stunde in einer hohen Bildqualität zu erreichen. Die ersten Ergebnisse zu dieser Studie zeigen, dass eine automatische Datenanalyse mittels Simplex Volume Maximization bereits in der Lage ist die Sorten je nach Befall zu unterscheiden. Weiterhin dient der so reduzierte Datensatz als Grundlage für weitere Datenanalysemethoden wie Spectral Angle Mapper und Support Vector Machines. Für diese überwachten Lernverfahren wird ein Datensatz von Experten annotiert und als Trainingsdaten verwendet, um mit dem optimierten Modell große Datenmengen zu klassifizieren. Durch eine Kombination der erwähnten Datenanalysen könnte es gelingen eine Bestimmung der Befallsstärke mit ähnlicher Genauigkeit wie auf Blattebene zu erreichen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass hyperspektrale Sensoren als objektives und nicht-invasives Mittel zur Bestimmung der Anfälligkeit unterschiedlicher Gerstensorten geeignet sind. Durch eine Automatisierung von Hochdurchsatzmessungen kann der Aufwand bei der Phänotypisierung resistenter Sorten zukünftig verringert werden.

Danksagung

Diese Arbeit konnte mittels finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Kompetenznetzwerkes – ‘CROP.SENSE.net’ (Finanzierungs Code: 0 315 529), Nachwuchs Forschungsgruppe ‘Hyperspectral phenotyping of resistance reactions of barley’ und dank der finanziellen Unterstützung der Daimler und Benz Stiftung durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- BERGSTRÄSSER S., FANOURAKIS D., SCHMITTGEN S., CENDRERO-MATEO M.P., JANSEN M., SCHARR H., RASCHER U. (2015):** HyperART: non-invasive quantification of leaf traits using hyperspectral absorption-reflectance-transmittance imaging. *Plant Methods* **11**, 1 – 17.
- BOCK C.H., POOLE G.H, PARKER P.E., GOTTWALD T.R. (2010):** Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. *Critical Reviews in Plant Sciences* **29**, 59 – 107.
- FURBANK R.T., TESTER M. (2011):** Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science* **16**, 635 – 644.
- HILLNHÜTTER C., MAHLEIN A.-K., SIKORA R.A., OERKE E.-C. (2012):** Use of imaging spectroscopy to discriminate symptoms caused by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* on sugar beet. *Precision Agriculture* **13**, 17 – 32.
- MAHLEIN A.-K., STEINER U., HILLNHÜTTER C., DEHNE H.-W., OERKE E.-C. (2012):** Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods* **8**, 3.
- THOMAS S., WAHABZADA M., KUSKA M.T., RASCHER U., MAHLEIN A.-K. (2016):** Observation of plant-pathogen interaction by simultaneous hyperspectral imaging reflection and transmission measurements. *Functional Plant Biology* **44**, 23-34.
- THURAU C., KERSTING K., WAHABZADA M., BAUCKHAGE C. (2012):** Descriptive matrix factorization for sustainability adopting the principle of opposites. *Data Mining and Knowledge Discovery* **24**, 325–354.
- ZHAO Y.-R., XIAOLI L., YU K.-Q., CHENG F., HE Y. (2016):** Hyperspectral imaging determining pigment contents in cucumber leaves in response to angular leaf spot disease. *Scientific Reports* **6**:277790

Remote Sensing im Agrarbereich mittels hyperspektraler Kameratechnologie von Cubert

Remote sensing in the agriculture sector using hyperspectral camera technology from Cubert

Thore Klink, Timo Bressmer

Cubert GmbH, Albstraße 5, 89081 Ulm

E-Mail: research@cubert-gmbh.de

Zusammenfassung: Die hyperspektrale Datenaufnahme hat in letzter Zeit im landwirtschaftlichen Bereich für Konzepte wie „smart farming“ oder „precision farming“ stark an Bedeutung gewonnen. In kurzer Zeit entstanden in diesem Bereich verschiedene Kameratechnologien, mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen. Wir wollen einen Überblick über diese Technologien geben und konkrete Einsatzszenarien in aktuellen Forschungsprojekten vorstellen, sowie ein Konzept für eine schnellere Implementierung und Anwendung aktueller Forschungsergebnisse in der Agrarpraxis vorstellen.

Deskriptoren: Hyperspektrale Datenaufnahme, Sensor Technologie, UAV, Smart Farming, Chemometrie

Abstract: *Hyperspectral data collection has become increasingly important in the agricultural sector for concepts such as "smart farming" or "precision farming". Within a short time, various camera technologies were developed in this area, with different strengths and weaknesses. We want to give an overview of these technologies, and to present concrete application scenarios in current research projects, as well as present a concept for faster deployment and application of current research results in agriculture praxis.*

Keywords: *Hyperspectral data acquisition, sensor technology, UAV, Smart Farming, Chemometrics*

1 Einleitung

Im landwirtschaftlichen Bereich haben in letzter Zeit Konzepte wie „smart farming“ oder „precision farming“ stark an Bedeutung gewonnen. Diesen Trends, aber auch dem zunehmenden Dokumentationsaufwand im Agrarsektor liegt eine Gemeinsamkeit zugrunde: Die starke Abhängigkeit von Daten, die die Flächen möglichst in allen wichtigen Dimensionen adäquat beschreiben.

Hyperspektrale Sensoren stellen eine Möglichkeit dar, diese angestiegene Nachfrage nach relevanten Daten zu befriedigen. Doch aufgrund einer großen Vielfalt und stark variierendem Funktionsumfang der kommerziellen Sensoren stellt die Aufnahme von hochqualitativen hyperspektrale Daten heutzutage eine große Herausforderung dar. Wir möchten diese Gelegenheit nutzen, um einen Überblick über den Stand der Technik und aktuelle Trends zu geben und die Stärken, aber auch die Grenzen der Technologie aufzuzeigen.

Die Cubert GmbH ist Vorreiter auf dem Gebiet der vollflächig hyperspektral bildgebenden Sensorik. Auf Basis einer von der Cubert GmbH patentierten Innovation (Patent: „Räumlich spektral auflösende Hyperspektralkamera und Verfahren“) ermöglicht diese Technologie weltweit erstmals die hochaufgelöste Messung hyperspektraler Daten mit Videobildrate. Luftgestützte Feldversuche und der Vergleich der Hyperspektraldaten mit Punktspektrometerdaten bestätigen die Validität der Messmethodik (JUNG *et al.* 2013a, JUNG *et al.* 2013b).

Seit der Ausgründung im Jahr 2012 werden die Sensoren der Cubert GmbH in verschiedensten Anwendungen der Agrarindustrie, der Medizintechnik und auch in der Materialprüfung eingesetzt.

Die Hyperspektralkameras von Cubert sind in der Lage, berührungslos Chemometrie zu betreiben. Hyperspektrale Bildgebung sammelt und verarbeitet Informationen aus dem elektromagnetischen Spektrum im Frequenzbereich UV/VIS. Während das menschliche Auge die Farben des sichtbaren Lichts in drei Frequenzbändern rot, grün und blau zu einem farbigen Bild zusammensetzt, stellt die Hyperspektralkamera für jeden Pixel das elektromagnetische Spektrum in einem viel breiteren Frequenzband bereit.

Diese fürs Auge nicht wahrnehmbare zusätzliche Information schafft im landwirtschaftlichen Bereich neue Möglichkeiten. Vor allem die Möglichkeit den Wachstums- und Gesundheitszustand von Feldfrüchten über Indizes wie beispielsweise NDVI, SRI oder EVI flächendeckend überwachen zu können um bei Problemen über eine umfassende Entscheidungsgrundlage zu verfügen, hat großes Potential für Landwirte.

Diese Sensorik wird im Moment in verschiedensten Anwendungen in der Medizintechnik und dem Agrarumfeld auf verschiedene Trägerplattformen wie z.B. UAV und Traktoren eingesetzt.

Der momentane Fokus von hyperspektral Messungen liegt wie oben beschrieben in dem Bereich „precision farming“. In diesem Forschungsbereich nimmt Cubert an zwei Förderprojekten teil:

Das Projekt „MartA“ ist ein wichtiger Schritt im „precision agriculture“ Sektor. Es zielt darauf ab, hyperspektrale Überwachung von Kulturen zu verwenden, um eine robuste Krankheitserkennung und nachfolgende intelligente Reaktionen, wie spezifische Fungizid- Anwendungen, zu ermöglichen. Im speziellen sollen verschiedene Krankheiten im frühestmöglichen Stadium erkannt und klassifiziert werden, sodass eine rechtzeitige

und angepasste Behandlung getätigt werden kann. Dadurch kann der Pestizideinsatz auf ein Minimum reduziert und der Ernteertrag hingegen merklich gesteigert werden. Die Cubert GmbH stellt einen hyperspektralen Sensor zur Verfügung, führt Messungen durch und entwickelt Algorithmen zur Erkennung von Krankheiten.

Die Verknüpfung verschiedener Technologien, um die jeweiligen Stärken ausnutzen zu können, wird in dem Obstbau-Forschungsprojekt „BigApple“ ergründet. Das Big Data Konsortium hat die Ziele: Das Fruchtwachstum optimaler zu regulieren, den Erntezeitpunkt besser zu bestimmen und somit die Fruchtqualität zu steigern, um Lagerverluste zu verringern. Kontaktlose Chemometrie durch hyperspektrale Aufnahme und die Anwendung entwickelter Algorithmen bildet hierbei eine entscheidende Grundlage, um Aussagen über die physiologischen Pflanzenparameter des im Wachstum befindlichen Apfels zu treffen. Ein zu entwickelndes Prognosemodell, das neben den aus den Hyperspektraldaten abgeleiteten Parametern auch zusätzliche Informationen wie z.B. Sensor- oder Wetterdaten berücksichtigt, soll dann optimale Handlungsempfehlungen ausgeben.

Die Förderung der Vorhaben „Big Apple“ und „MartA“ erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

2 Material und Methoden

Die Cubert GmbH ist weltweit die erste Firma welche sich vollständig auf Snapshot Hyperspectral Imaging konzentriert. Wir waren 2012 die ersten, welche eine hochaufgelöste Hyperspektralkamera anbieten konnten, die weniger als eine Millisekunde zur Messung eines vollständigen hyperspektralen Würfels benötigt. In den letzten Jahren haben wir maßgeblich unsere Technologiebasis erweitert und bieten heute spektrale Messtechnik auf Basis von 3 verschiedenen Wirkprinzipien an. Die Gemeinsamkeit aller Systeme ist die vollständige Abbildung spektraler Daten durch eine Linse in weniger als einer Millisekunde, sowie die Integration in ein benutzerfreundliches und einfach erweiterbares Softwarepaket.

Filter on Chip (FOC):

Bei der Filter-on-Chip Technologie werden unterschiedliche Interferenzfilter per Lithographie direkt auf den Kamerasensor aufgebracht. Durch das entstandene Mosaikmuster wird, ähnlich wie bei RGB-Kameras, derselbe Bildausschnitt für unterschiedliche Wellenlängenbereiche aufgenommen.

Diese Technologie zeichnet sich durch einen sehr hohen Integrationsgrad, mechanische Stabilität, eine mittelgroße Anzahl von Kanälen (typischerweise 10-40) und relativ hohe räumliche Auflösung aus. Die zugrundeliegende CMOS Technologie ist im Signal-zu-Rausch Verhältnis begrenzt.

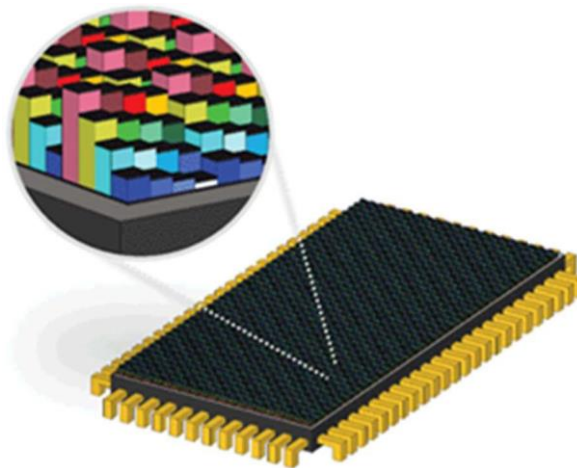


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Filter on Chip Technologie, Mosaikmusters auf einem Kamerasensor.

Line Scanner

Linien-Scanner teilen sich das Wirkprinzip mit der Filter-On-Chip-Technologie:

Interferenzfilter werden auf den Kamerasensor lithographisch aufgebracht, in diesem Fall allerdings in Streifenform. Dadurch lassen sich relativ viele verschiedene Kanäle auf einem Sensor aufbringen (typischerweise 70-100), allerdings müssen sich die Messdaten sehr stark überlappen, um die ursprüngliche Szene für alle Wellenlängen reproduzieren zu können.

Diese Systeme zeichnen sich daher meist durch eine komplizierte Datenauswertungsphase nach der Aufnahme aus, besitzen aber eine hohe mechanische Stabilität, eine sehr hohe räumliche Auflösung und relativ niedrige Anschaffungskosten. Diese Systeme können nicht als "snapshot imager" bezeichnet werden, da mehrere Bilder zur Berechnung der Hyperspektraldaten eines Bildausschnittes verwendet werden. Auf dem Gebiet dieser speziellen Luftbildauswertung arbeiten wir exklusiv mit dem Institut VITO (Belgien) zusammen und bieten eine cloudbasierte Softwarelösung an.

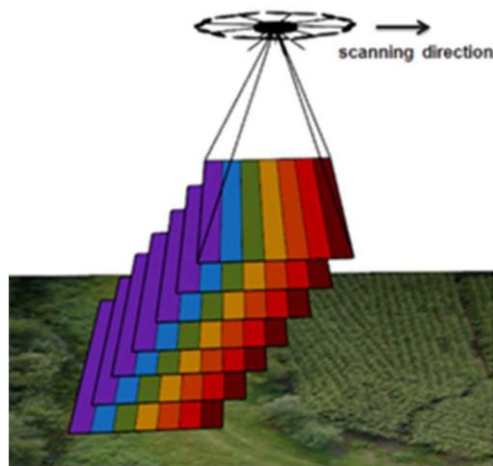


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Line Scanners

Multisensor

Multisensorsysteme besitzen im Allgemeinen einen einzelnen dedizierten Sensor pro Wellenlängenbereich. Dadurch besitzt das System eine sehr geringe Anzahl von Kanälen (4-6), eine sehr hohe räumliche Auflösung und geringe Anschaffungskosten. Da man die Filter vor den Sensoren beim Kauf spezifizieren kann, lassen sich diese Systeme sehr gut auf ein spezielles Problem anpassen und bieten eine kostengünstige und hochaufgelöste Applikationslösung. Durch die von uns durchgeführte optische Überlagerung aller Sensoren werden alle Kanäle durch eine Linse aufgenommen

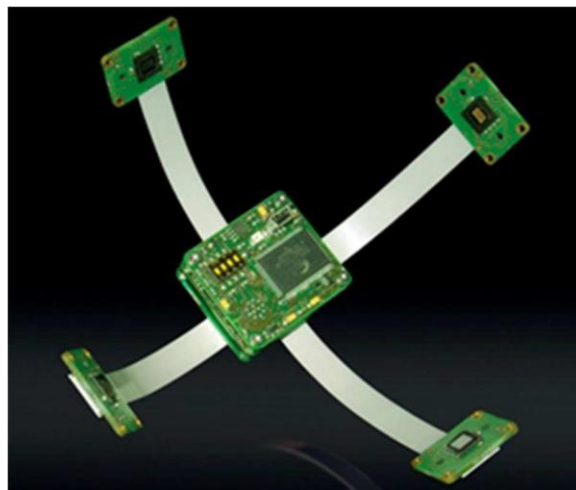


Abbildung 3: Darstellung der Sensorkonfiguration eines Multisensorsystems

Multi Point Spektrometer

Multi Point Spektrometer lassen sich am besten als viele einzelne Punktspektrometer mit nicht überlappenden Bildbereichen beschreiben, die parallel betrieben werden. Diese Systeme zeichnen sich meist durch eine hohe Anzahl von Kanälen (100-135) ein sehr gutes Signal-zu-Rausch Verhältnis und einem sehr hohen Lichtdurchsatz, jedoch eine geringere räumliche Auflösung aus. Durch die Verrechnung der Hyperspektraldaten mit einem hochaufgelösten Graubild können diese Kameras trotzdem auch für kontrast- und detailreiche Bildausschnitte verwendet werden.

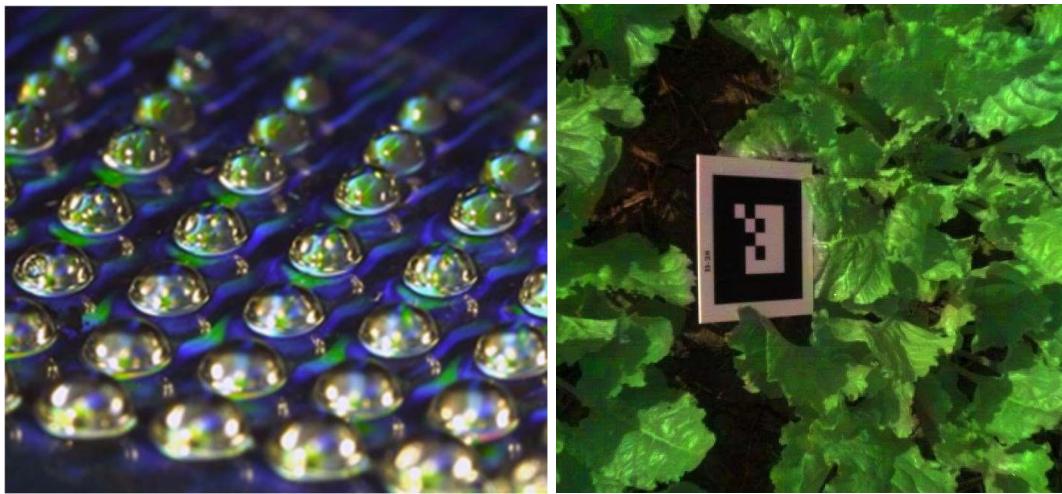


Abbildung 4: Darstellung eines Mikrolinsenarrays, Bauteil eines Multi Point Spektrometers (links), Beispielaufnahme von Zuckerrüben im Feld, mittels Multi Point Spektrometers aufgenommen (rechts)

3 Methodenentwicklung

Eine typische Anwendung des Multi Point Spektrometers in der Agrarwirtschaft zur Bestimmung spezifischer Oberflächeninformationen folgt einem einheitlichen Konzept. Durch Verwendung einer Kamera mit hoher spektraler Auflösung können Wellenlängen in einem großen zu untersuchenden Bereich aufgenommen werden. Nach algorithmischer Analyse der Spektraldaten können einzelne relevante Wellenlängen ausgewählt werden, die einen großen Beitrag zur Differenzierung zwischen verschiedenen Objekten oder zur direkten Klassifizierung leisten. Anschließend ist es möglich eine einfachere und kostengünstigere multispektrale Kamera auszuwählen, die die signifikanten Wellenlängen aufnimmt. Dadurch kann ein verlässliches Ergebnis mit höherer räumlicher Auflösung und zu geringeren Kosten erzielt werden. Außerdem erlaubt die höhere Auflösung einen flexibleren Einsatz z.B. mit größerem Arbeitsabstand.

In unseren Projektbeispielen “MartA” und “BigApple” verfolgen wir exakt diesen Ansatz. Bei “MartA” identifizieren wir die relevanten Wellenlängen, um primär frühestmöglich Krankheiten zu erkennen und sekundär bestmöglich zwischen den Krankheiten Cer-

cospora und Pseudomonas bei Zuckerrüben zu unterscheiden. Ein Vergleich der beiden Krankheitsspektren ist in **Abbildung 5** illustriert und belegt die Machbarkeit der Differenzierung.

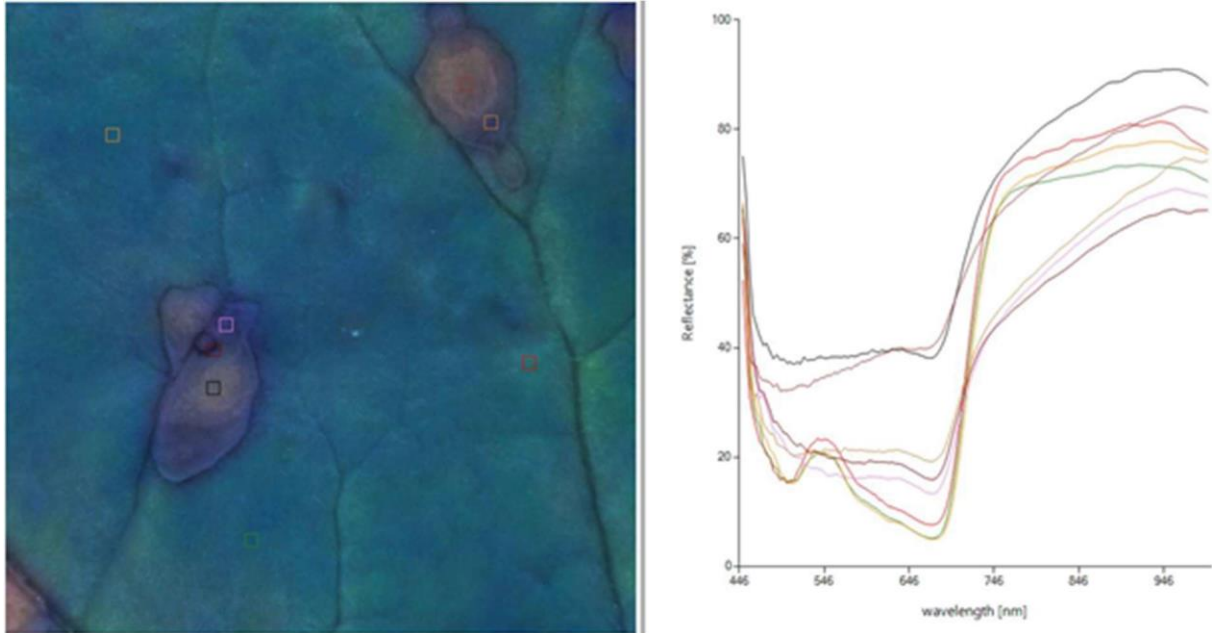


Abbildung 5: Das Pseudo-RGB-Bild (links) enthält Pseudomonas-Bereiche und einen Cercospora-Bereich im Inneren des linken Pseudomonas-Flecks. Ausgewählt sind drei Blattflächen, die die zu erwarteten Blattspektren (rechts) ergeben. Die vier ausgewählten Pseudomonas- Punkte zeigen alle äquivalente Spektren und unterscheiden sich nur in der Intensität. Das Cercospora-Spektrum (2. Spektrum von oben bei 600nm) unterscheidet sich deutlich von dem Verlauf der anderen Spektren.

Bei dem Projekt “BigApple” sind wir bereits in der Klassifizierungsphase. Erstes Ziel war die Unterscheidung von grünen Äpfeln zu Blättern. Die Verwendung von drei verschiedenen Indizes, die auf algorithmisch ermittelten stark unterscheidenden Spektralkomponenten basieren, führt zu der Falschfarbendarstellung auf der rechten Seite von **Abbildung 6**.

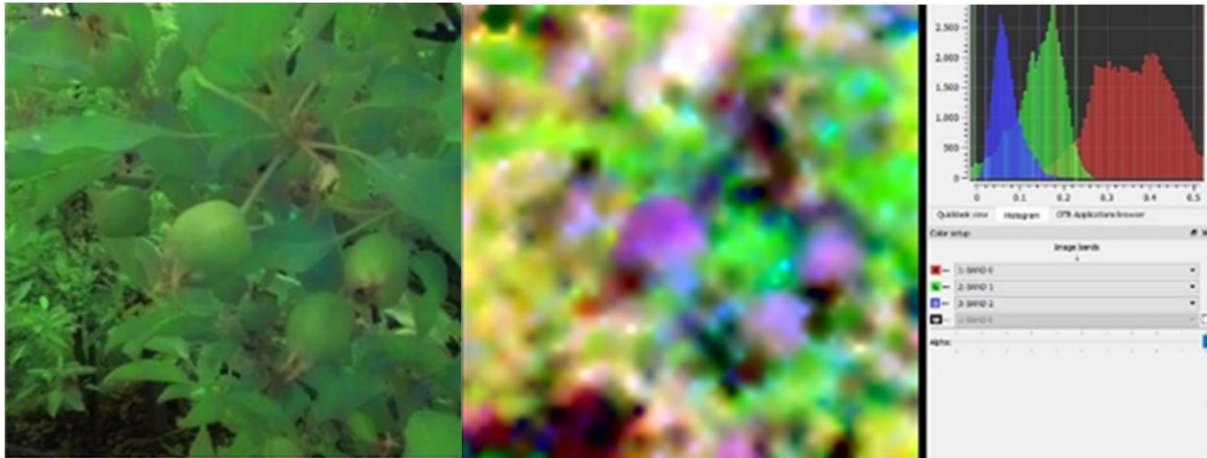


Abbildung 6: Vergleich eines Pseudo-RGB-Bildes (links) mit dem indexbasierten Bild (rechts) eines Apfelbaumabschnitts. Alle Äpfel werden in leichten lila Farben (rechte Seite) dargestellt. Ebenfalls werden kleine Äpfel im Hintergrund als sich von Blättern unterscheidende Objekte identifiziert. Aufgrund des angewandten Algorithmus sind sie zunächst bläulicher markiert.

Entscheidender Punkt bei dem in unseren Projekten angewendeten allgemeinen Konzept ist die Entwicklung des Algorithmus, der die signifikanten Wellenlängen identifiziert bzw. sogar optimale Filter für eine Multisensorkamera auswählt. Außerdem muss getestet werden, ob diese reduzierte Information für die konkrete Regressions- oder Klassifikationsaufgabe ausreicht.

Insgesamt hat sich herausgestellt, dass die Kosten zur Aufnahme von Referenzdaten im landwirtschaftlichen Bereich für auf Hyperspektraldaten basierenden Modellen oft die Materialkosten der eingesetzten Kameras bei weitem übertreffen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, solche entwickelte Modelle einem breiten Kundenstamm gegen Vergütung zur Verfügung zu stellen.

Im abschließenden Abschnitt wird daher ein Konzept zur leichten Bereitstellung solcher Modelle mithilfe einer Plattform von Cubert vorgestellt.

4 Diskussion

Wie im obigen Teil dargestellt, können Hyperspektralaufnahmen sehr relevante Daten für typische Fragestellung im Agrarbereich bereitstellen. Allerdings ist die Entwicklung eines Modells für eine bestimmte Feldfrucht bzw. Fragestellung sehr zeit- und arbeitsintensiv da meist mehrere Wachstumsphasen benötigt werden, um das Modell zu trainieren und zu validieren. Durch diese lange Forschungsphase und den hohen finanziellen Aufwand ist es von entscheidender Bedeutung, diese Modelle nach der Forschungsphase so schnell wie möglich den Landwirten bereitstellen zu können. Auch in der Literatur wird festgestellt, dass eine Standardisierung der Georeferenzierung und Mosaikberechnung, sowie der Informationsextraktion für ein zuverlässiges Endprodukt für Landwirte notwendig sei (ZHANG & KOVACS 2012).

Die Firma Cubert verfolgt einen Plattformgedanken, der in Zukunft durch eine einheitliche Softwareschnittstelle die Ansteuerung aller oben beschriebenen Kameratechnologien sowie durch ein geeignetes Vertriebsmodell die direkte Bereitstellung von Programmiererweiterungen zur Unterstützung bei landwirtschaftliche Fragestellungen an Endkunden erlauben soll.

Dadurch wollen wir einen Wissenstransfer von der Wissenschaft direkt hin zu den Landwirten erleichtern. Ein erstes erfolgreiches Beispiel für die Integration von Drittanbietern ist hierbei die Kooperation mit dem Forschungsinstitut „Vito“, das für uns die Verarbeitung von Liniensensordaten bis hin zu einer vollflächigen spektralen Karte übernimmt.

Literaturverzeichnis

- JUNG A., MICHELS R., GRASER R. (2013 A):** Non-scanning Hyperspectral Imaging Camera for UAS Platforms (Nichtscannende hyperspektrale Kamera für UAS Plattformen). 19. CBA – Workshop und 2. UAS – Workshop, 6. – 7. Mai 2013, Berlin, Germany. Bornimer Agrartechnische Berichte (ISSN 0947-7314), 81:141-147
- JUNG A., MICHELS R., GRASER R. (2013 B):** Hand-held Imaging Spectroscopy and Hyperspectral Video Technique – Non-scanning Spectral Imaging Mobile Mapping. 8th EARSeL SIG Imaging Spectroscopy Workshop Nantes, France 8 – 10 April 2013
- ZHANG C., KOVACS J.M. (2012):** The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture, December 2012, Volume 13, Issue 6, pp 693–712, DOI: 10.1007/s11119-012-9274-5

Aus- und Weiterbildungskonzepte zu bildgebende Sensorsystemen

Further Education Concepts for Image Based Systems

Arno Ruckelshausen, Axel Höh, Andreas Linz

Hochschule Osnabrück, Competence Center of Applied Agricultural Engineering (COALA),
Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück,
E-Mail: bildgebende-sensortechnik@hs-osnabrueck.de, a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Die Verfügbarkeit verschiedener bildgebender Sensorsysteme ist sehr stark angestiegen, dies betrifft auch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Bildverarbeitungsprogramme. Im Falle einer weniger komplexen Bildverarbeitung steht daher die Auswahl der bildgebenden Systeme für robuste Lösungen im Fokus, insbesondere für Applikationen mit dynamischen Störgrößen wie in der Landwirtschaft. Es wird daher ein Konzept für einen Zertifikatskurs der beruflichen Weiterbildung entwickelt und erprobt, der Grundlagen und praktische Erfahrungen im Bereich bildgebender Systeme in der Agrar- und Lebensmitteltechnik vermittelt. Die Motivation und das Konzept werden beschrieben, ebenso erste Praxiserfahrungen.

Deskriptoren: Bildgebende Sensorsysteme, Weiterbildung, Lehrformen

Abstract: *The availability of various image based systems has been increased, which is also true for the availability of powerful image processing programs. As a consequence, in the case of less complex image processing, the selection of imaging systems for robust solutions has come into focus, in particular for applications with dynamic noise sources such as in agriculture. A concept for a certificate course as further education and training has been developed and tested, which provides basic knowledge and practical experience in the field of imaging systems in agricultural and food technology. The motivation and the concept are described, as well as first practical experiences.*

Keywords: *image based systems, further education, teaching*

1 Motivation

Die Verfügbarkeit von Kamerasystemen ist in den letzten Jahren sehr stark angestiegen, der Bereich „Imaging“ stellt für viele Anwendungsgebiete eine Schlüsseltechnologie dar. Der Querschnittscharakter in Verbindung mit der technischen und gesellschaftlichen Bedeutung von Kamerasystemen erfuhr im Jahr 2009 durch die Vergabe des Nobelpreises für Physik – im Sinne eines „Ingenieur-Nobelpreises“ – eine besondere

Würdigung. Die Fortschritte in der Elektronik und Informatik haben auch in der Landwirtschaft zunehmend Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit Imaging-Technologien gefördert (ZHANG 2016, WELTZIEN & GEBBERS 2016, RUCKELSHAUSEN 2016). Allerdings sind die Rahmenbedingungen im Vergleich zur industriellen (Indoor-)Produktion oder dem Automotive-Bereich deutlich komplexer: Landmaschinen müssen Outdoor nicht nur fahren, sondern auch arbeiten und sind insbesondere einer Vielzahl dynamischer Störgrößen ausgesetzt. Beispiele sind Sonnenlicht, Staub, Feuchtigkeit oder Erschütterungen. Trotz dieser schwierigen Rahmenbedingungen gibt es erhebliche Fortschritte. Dies wird am Beispiel von 5 Medaillen als Auszeichnungen für Innovationen auf der Agritech 2015 belegt (DLG e.V. 2015): Kamerasysteme zur Fahrerassistenz mit Bildverarbeitung (Fendt, Deutz-Fahr) und erweiterter Realität (John Deere, siehe **Abbildung 1**, rechts), der Einsatz von Smart Phones (Amazonen-Werke, siehe **Abbildung 2**, rechts) oder der Einsatz von Laserscanner zur Höhenführung (Horsch) sind Beispiele für den Pflanzenbau.



Abbildung 1: Beispiele für den Kameraeinsatz in der Landwirtschaft: Teilbreitensteuerung auf Grundlage einer Bildanalyse (links, Quelle: AgriCon GmbH); „Birdview“ mit erweiterter Realität auf Grundlage mehrerer Kamerasysteme zur Fahrerassistenz (rechts, Quelle: John Deere).

Die Komplexität der jeweiligen Anwendungen in Verbindung mit einer zunehmenden Vielzahl verschiedener bildgebender Technologien lenkt den Fokus stärker auf die Auswahl bildgebender Systeme für die Applikation unter spezifischen Störgrößeneinflüssen. Die Bildverarbeitung mit Bildinterpretation ist zwar weiterhin maßgeblich für die Umsetzung der Analyseergebnisse in Handlungsanweisungen, jedoch steht mit den heute verfügbaren Werkzeugen eine schlagkräftige Unterstützung bei der Bildverarbeitung zur Verfügung, die im Falle weniger komplexer Situationen bereits nicht mehr das „Bottleneck“ darstellt. **Abbildung 1** zeigt den Einsatz von Kameras in verschiedenen Praxissituationen der Landwirtschaft. In **Abbildung 2** wird die Vielfalt bildgebender Sensorsysteme am Beispiel eines bildgebenden Lichtschattensensors (KOVACHEVA *et al.* 2015, NIEBERG 2015) verdeutlicht. Derartige Sensoren werden bisher überwiegend in der Sicherheitstechnik eingesetzt, ermöglichen aber in der Landwirtschaft – speziell im

Feldversuchswesen und der Pflanzenphänotypisierung (Ruckelshausen & Busemeyer 2015) – eine völlig neue Sichtweise. Auch die große Verbreitung der Smartphones eröffnet zunehmend neue Applikationen, z.T. in Verbindung mit neuen Geschäftsmodellen.

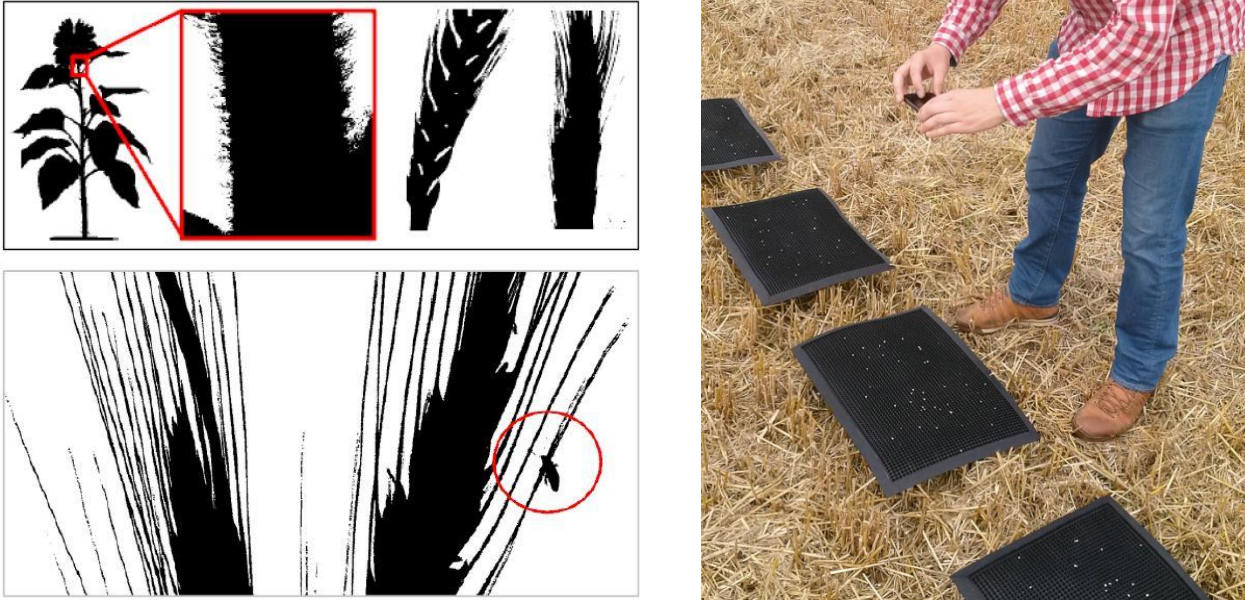


Abbildung 2: Beispiele für verschiedenartige bildgebende Sensorsysteme in der Landwirtschaft: Hochauflöser Lichtschattensensor zur Pflanzenphänotypisierung (Quelle: NIEBERG 2015); Aufnahme und Bildverarbeitung zur Querverteilung von Düngerkörnern mit einer Smartphone-App (Quelle: „EasyCheck“, Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG)

Diese Überlegungen in Verbindung mit der hohen Innovationsrate in dieser Domäne haben zur Idee eines Weiterbildungsangebotes im Themenbereich bildgebender Sensortechnologien für Teilnehmer aus Landtechnik- und Industrieunternehmen sowie anderen Einrichtungen geführt. Hinzu kommen Erfahrungen mit Studierenden an der Hochschule Osnabrück beim praktischen Umgang mit bildgebenden Technologien. Hier wurden in den letzten Jahren Erfahrungen mit den Lehrmethoden „Fortgeschrittenen-Praktikum“ und „Case Studies“ gewonnen. Die Studierenden aus den Studiengängen der Elektrotechnik, Informatik und Mechatronik (Gruppen mit typischerweise 2 Studierenden) führen nur einen oder zwei Praktikumsversuche mit klassischen Anleitungen durch und entwickeln eigene Ideen zur Nutzung der bildgebenden Technologien. Diese werden dann durchgeführt, ausgewertet und in der großen Gruppe diskutiert. Diese Form des Praktikums – „Fortgeschrittenen-Praktikums“ – fördert die Initiative der Studierenden und hat schon zu vielen Ideen geführt, die weiterverfolgt wurden. Das Feedback der Studierenden ist sehr positiv. Weitere Erfahrungen wurden mit Fallstudien (Case Studies) gewonnen, bei denen die Studierendengruppe (ca. 5 Teilnehmer_innen) – ohne zusätzliche „Heimarbeit“ – innerhalb von 2 Zeitblöcken mit je 4 Stunden eine

Fragestellung konzeptionell und mit technologischer Unterstützung im Sinne einer Machbarkeit bearbeiten und präsentieren. Hier werden überwiegend Raspberry Pi-Kamerasysteme mit installierter Bildverarbeitung (openCV) und gegebenenfalls weiteren Sensoren genutzt, die eine schnelle Einarbeitung für die Studierenden ermöglichen. Die positiven „hands-on“-Erfahrungen sind in das Konzept für das Weiterbildungsangebot eingeflossen.

2 Konzept des Zertifikatskurses

Im Rahmen des geförderten Verbundprojektes AgriCareerNet (AGRICAREERNET 2017) wird das Weiterbildungsangebot in Form eines Zertifikatskurses „Bildgebende Systeme in der Agrar- und Lebensmitteltechnik“ aufgebaut. Neben den oben dargestellten Bezügen zur Landtechnik ergeben sich ähnliche Bezüge (z.T. überlappend) für den Lebensmittelbereich.

Zielgruppe für den Kurs sind zunächst Teilnehmer aus der Industrie, die sich einen Überblick und praxisorientierten Einblick in die bildgebenden Sensortechnologien mit dem Fokus auf Landwirtschaft/Lebensmitteltechnik verschaffen möchten. Die Teilnehmerzahl sollte zwischen 10 und 15 liegen, so dass von typischerweise drei Ansprechpartnern eine gute Betreuung der Hands-on-Phasen gewährleistet ist. Der eintägige Kurs fokussierte sich zunächst auf eine Übersicht zu bildgebenden Sensortechnologien. Hier werden auch technologische Grundlagen zu CCD- und CMOS-Sensoren, Farbe und Lichttechnik knapp erläutert. Die individuellen Interessen der Teilnehmer_innen werden aufgenommen. Anschließend gibt es zu ausgewählten Themen bildgebender Sensorik Kurzvorträge, die bereits auf das spätere praktische Arbeiten mit den Systemen hinweisen. Beispiele für Kurzvorträge sind: Hochgeschwindigkeitskameras, Multi- und Hyperspektralsysteme, 3D-Sensoren, kombinierte Spektral/3D-Systeme (MWLP, STROTHMANN *et al.* 2017), Low-Cost-Sensoren und Lichtschattensensoren. Darüber hinaus wird auf Konzepte der Bildverarbeitungs-Werkzeuge, Simulationsumgebungen (wie ROS), Smart Sensors oder Sensor-Daten-Fusion eingegangen. Im Laufe des Nachmittags beginnt die Hands-on-Phase, in die mit einem Laborrundgang zum Einsatz bildgebender Technologien in Forschungsprojekten übergeleitet wird. Für das praktische Arbeiten stehen Labormessplätze mit bildgebenden Sensortechnologien zur Verfügung, entsprechende Softwarewerkzeuge zur Visualisierung oder eine erste Bildverarbeitung sind installiert. In **Tabelle 1** wird eine Übersicht zu den Technologien gegeben.

Der eintägige Zertifikatskurs endet mit einer offenen Diskussion zu Fragen der Teilnehmer_innen und einem Feedback zum Kurs. Weiterhin werden Fragebogen zur Evaluation des Zertifikatskurses ausgefüllt.

Tabelle 1: Übersicht zum Einsatz von Technologien bei der Erprobung des Zertifikatskurses „Bildgebende Systeme in der Agrar- und Lebensmitteltechnik“.

Bildgebende Sensortechnologien	
Hyperspektral-Kameras (VIS, NIR)	3D-Time-of-flight-Kamera
Multispektralkamera	Laserscanner (2D/3D)
Programmierbarer Spektralfilter	Stereokamera
IR-Wärmekameras	Lichtschnittkamera
Lichtgitter/Lichtschattensensoren	Plenoptische Kamera
Low-Cost Imaging (Kinect, Raspberry Pi)	Hochgeschwindigkeitkameras (bis 1 Mfps, Grauwerte/Farbe)
Software-Werkzeuge zur Unterstützung:	
Matlab (mit Image Processing und Computer Vision Toolbox)	Labview (mit NI Vision Builder for Automated Inspection)
Open CV	ImageJ
Robot Operating System (ROS)	Eigene Programme

3 Erste Erfahrungen und Ausblick

Im Rahmen des Fördervorhabens wurden erste Erfahrungen zur Durchführung eines Zertifikatskurses gewonnen, teilgenommen haben Mitarbeiter_innen aus Unternehmen, die Produkte und Services für die Landwirtschaft anbieten. Neben einem insgesamt sehr positiven Feedback gab es Anregungen für die weitere Entwicklung des Kurses. Beispiele sind insbesondere die bereits angedachte differenziertere Zielgruppenorientierung, die fachliche Schwerpunktbildungen oder Fokussierungen ermöglicht (es gab sowohl Interesse für mehr Grundlagen als auch mehr Hands-on-Zeitfenster). Gegebenenfalls können nur kurz angesprochene Schnittstellen der bildgebenden Sensortechnologien zur Weiterverarbeitung ausführlicher erläutert werden (Beispiele: Sensor-Daten-Fusion oder Simulationstechnologien).

Die praktische Durchführung eines „Test-Kurses“ hat mit den Praxiserfahrungen und dem konstruktiven Feedback wichtige Impulse für die weitere Ausgestaltung des Zertifikatskurses geboten. Das Interesse zeigt die Bedeutung des Themas für die Praxis.

Danksagung

Die Entwicklung und Praxiserprobung des Zertifikatskurses „Bildgebende Systeme in der Agrar- und Lebensmitteltechnik“ an der Hochschule Osnabrück wird im Rahmen des Verbundprojektes „AgriCareerNet“ sowie der Qualifizierungsinitiative „Aufstieg durch Bildung: offene Hochschulen“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Literaturverzeichnis

- AgriCareerNet:** Netzwerk für Agrarkarrieren, URL: <http://www.agri-career.net/agricareernet/>, Forschungsprojekt Georg-August-Universität Göttingen und Hochschule Osnabrück, Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Stand: 14.03.2017.
- DLG e.V.:** Agritechnica – Neuheiten 2015, URL: <https://www.agritechnica.com/de/innovation-award/neuheiten-2015/>, Stand: 14.03.2017.
- Kovacheva I., Mentrup D., Kerksen S., Würschum T., Ruckelshausen A. (2015):** 1-Bit Imaging mit Lichtschrankensensoren zur Ähren- und Grannen-Detektion von Getreide. In GIL Jahrestagung (pp. 85-88).
- Nieberg D. (2015):** Innovative Lichtschrankensensoren zur Erfassung morphologischer Pflanzeigenschaften in Labor- und Feldversuchen, Master Thesis, Hochschule Osnabrück/The Plant Accelerator, University of Adelaide, Australia.
- Ruckelshausen A. (2016):** „Bildgebende Sensorsysteme auf dem Vormarsch / Sensorik – die Schlüsseltechnologie für den Pflanzenbau, LOP 11/216, ISSN 1432-9387, S. 20ff.
- Ruckelshausen A., Busemeyer L. (2015):** Towards digital and image based phenotyping; in: KUMAR, Jitendra; PRATAP, Aditya; KUMAR, Shiv. Phenomics in Crop Plants: Trends, Options and Limitations. Phenomics in Crop Plants: Trends, Options and Limitations, Springer, India.
- Strothmann W., Ruckelshausen A., Hertzberg J., Scholz C., Langsenkamp F. (2017):** Plant classification with In-Field-Labeling for crop/weed discrimination using spectral features and 3D surface features from a multi-wavelength laser line profile system, Computers and Electronics in Agriculture, 134, pp.79-93.
- Weltzien C. Gebbers R. (2016):** Aktueller Stand der Technik im Bereich der Sensoren für Precision Agriculture., Referate der 36. GIL-Jahrestagung, 22.-23. Februar 2016, Osnabrück, S. 217-220, ISBN 978-3-88579-647-3.
- Zhang Q. (2016):** Precision Agriculture Technology for Crop Farming, CRC Press.

UAV-gestützte Detektion von Kiebitznestern in Agrarflächen

UAV-based Detection of Lapwing Nests in Agricultural Fields

Martin Israel

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung,
Münchnerstr. 20, 82234 Wessling
E-Mail: martin.israel@dlr.de*

Zusammenfassung: Viele Bodenbrüter sind vom Aussterben bedroht, da die zunehmend intensivierete Landwirtschaft diesen Vögeln den natürlichen Lebensraum nimmt und beim Ausweichen auf Agrarflächen ihre Brut zerstört. Dieser Beitrag stellt eine neue Methode vor, mit der Nester von Kiebitzen und anderen Bodenbrütern gefunden werden können, um sie vor der Zerstörung durch Bodenbearbeitungs-Landmaschinen zu schützen. Ein Kiebitznest kann mit einer Thermalkamera auf einem kleinen unbemannten Fluggerät (UAV) aus einer Höhe von 40 m entdeckt werden. Die hier vorgestellte Bildverarbeitung für Mikrobolometer-basierte Thermalkameras ermöglicht eine Kontrasterhöhung von 10 bis 50%. Dies führt zu einer deutlichen Erleichterung bei der Detektion der Kiebitznester. In den Brutperioden der beiden Jahre 2015 und 2016 konnten in Mess-Kampagnen insgesamt 93% der Kiebitznester gefunden werden. Der Beitrag beschreibt den Systemaufbau, das Verfahren sowie Ablauf und Ergebnisse der Mess-Kampagnen.

Deskriptoren: UAV, Bodenbrüter, Detektion, Artenschutz, Drohne, MAV, RPAS, Multi-Kopter, Kiebitz, Nest

Abstract: *Many ground breeding birds are threatened with extinction, as increasingly intensified agriculture steal the natural habitat of the birds and destroys their broods when they breed on harvested agricultural fields. This paper introduces a new method of finding nests of lapwings and other ground breeding birds to protect them from being destroyed by tillage machines. A lapwing nest can be discovered with a thermal camera on a small unmanned aerial vehicle (UAV) from a height of 40 m. The image processing presented here for microbolometer-based thermal cameras allows a contrast enhancement of 10 to 50%. This improves the detection of the lapwing nests. In the breeding periods of the two years 2015 and 2016, a total of 93% of the lapwing nests could be found in measuring campaigns. The paper describes the system and the workflow and results of the measuring campaigns.*

Keywords: *UAV, ground breeding birds, detection, thermal imaging, drone, MAV, RPAS, lapwing, species protection*

1 Einleitung

Der Kiebitz (**Abbildung**, links) ist ein Zugvogel, der ursprünglich in Feuchtgrünlandflächen wie Marschwiesen, Vordeichwiesenflächen und anderen Weidelandschaften der Niederungen brütet. Aufgrund der zunehmend dichten Agrarlandbewirtschaftung weicht der Kiebitz immer mehr auf Ackerflächen aus, auf denen allerdings der Bruterfolg deutlich geringer ist. Ohne besondere arterhaltende Maßnahmen fallen die Eier der frühen Nester der Bodenbearbeitung zum Opfer.

Wenn man die Nester findet und dann so markiert, dass der Landwirt bei der Bearbeitung diesen Bereich ausspart, kann man den Bruterfolg erhöhen. Es bleiben dann Inseln, wie in **Abbildung 1** (rechts) zu sehen.



Abbildung 1 links: männlicher Kiebitz, Foto: A Trepte, www.photo-natur.de. Rechts: Von der Bodenbearbeitung freigelassene Insel, auf der sich zwischen den zwei Stäben ein Kiebitznest befindet.

Es hat sich aber gezeigt, dass diese Maßnahme alleine oft nicht ausreicht, um den für die Arterhaltung minimal nötigen Bruterfolg von 0,8 Küken pro Brutpaar (PEACH *et al.* 1994) zu erreichen. Um den Schaden durch Prädatoren zu minimieren, wird das Gelege (**Abbildung 2**) daher bei kritischem Bestand zusätzlich mit einem Elektrozaun umzäunt (SCHIFFERLI *et al.* 2006).



Abbildung 2: Beispiele von Kiebitznestern (gefunden im Rahmen der beschriebenen Kampagnen)

Die klassische Methode, um Kiebitznester zu finden, ist in **Abbildung 3** gezeigt. Mit einem Spektiv oder Fernrohr wird der brütende Kiebitz aus dem Auto heraus beobachtet. Manche Ferngläser sind mit einem Laserdistanzsensor ausgestattet. Damit kann die Entfernung zum Vogel genau gemessen werden. Da der Vogel bei Annäherung davonfliegt, wird ein Objekt angepeilt, das genau hinter dem auf dem Nest sitzenden Vogel liegt. Dieses wird bei Annäherung immer im Auge behalten. Der Vogel fliegt in der Regel bereits bei einer Annäherung auf 50 bis 100 m auf. Deshalb muss man blind der Peilung folgen und Schritte zählen. Diese Methode funktioniert nur, solange der brütende Kiebitz aus der Ferne sichtbar ist.

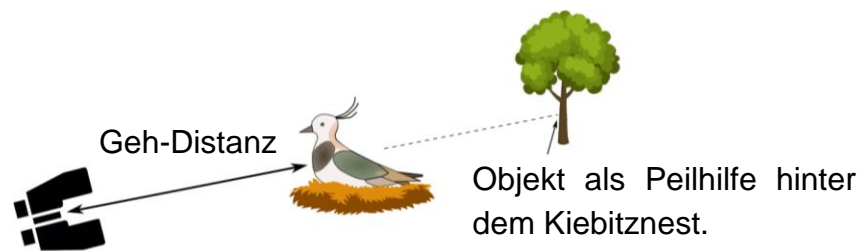


Abbildung 3: Die klassische Methode, um ein Kiebitznest zu finden.

Dass die UAV basierte Beobachtung von Wildtieren eine gute Alternative zu klassischen Beobachtungsmethoden sein kann, zeigen verschiedene Veröffentlichungen (z.B. CHABOT & BIRD 2012). Luftgestützte Thermalkameras werden ebenfalls bereits häufig zur Beobachtung von Wildtieren eingesetzt (HAVENS & SHARP 1998).

2 Material und Methoden

Die hier vorgestellte Methode mit einem UAV mit Wärmebildkamera könnte eine gute Ergänzung darstellen. Als Alternative zur klassischen Methode kommt die UAV-basierte Methode nur in Frage, wenn sie entweder schneller und/oder zuverlässiger ist.

Für die Detektion von Kiebitznestern ist ein kleines Rotor-basiertes UAV oder ein Micro Aerial Vehicle (MAV) geeignet. Beim automatisierten Flug mit Rotor-basierten UAVs kann man zwei Modi unterscheiden. Den Waypoint Modus und den Timelapse Modus. Beim Waypoint Modus werden Wegpunkte angeflogen und jeweils an jedem Wegpunkt ein oder mehrere Fotos aufgenommen. Die Wegpunkte sind so angeordnet, dass sie zu einem gewissen Grad überlappen. Beim Timelapse Modus wird die Kamera während des Überflugs in einem fest Zeittakt ausgelöst, oder es wird ein Video aufgezeichnet. Der Waypoint Modus hat den Vorteil, dass die Geolokalisierung der aufgenommenen Daten präziser erfolgen kann. Der Nachteil ist die geringere Flächenleistung.

Wir benutzen ein Drehflügler-MAV (Falcon 8, Fa. Ascending Technologies), das wir auch zum Detektieren von Rehkitzten benutzen (WIMMER *et al.* 2013). Die Payload besteht aus einer Thermal Infrarot (IR) Kamera (Tau 640, Fa. FLIR) mit einem 19 mm Ob-

ektiv und einer Kamera im sichtbaren (VIS) Spektralbereich (GoPro 3+ Black Edition) mit einem speziellen Objektiv mit schmalen Sichtwinkel.

Abbildung 4 zeigt das System. Die Bildrohdaten der Thermalkamera und einige Georeferenzierungsdaten des UAV werden von einem speziellen Datenlogger (FlirSD) von Ascending Technologies aufgezeichnet. Mit einem 5800 mAh LiPo Akku fliegt das MAV ca. 12 Minuten. Wir nutzen die Timelapse Strategie, um maximale Flächenleistung zu erreichen.

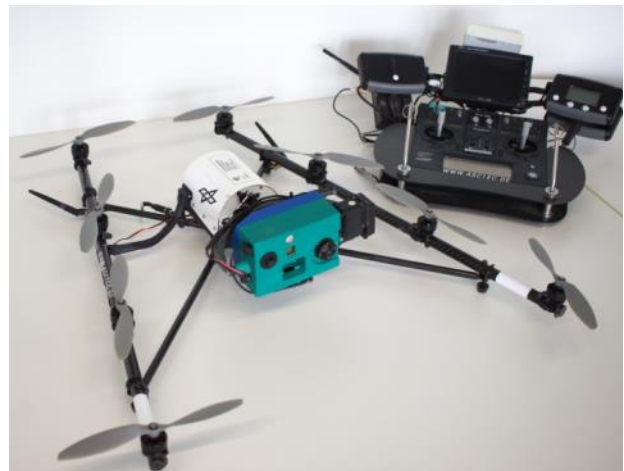


Abbildung 4: Falcon 8 von Ascending Technologies. In der grünen Payload-Box befindet sich eine Thermal und eine VIS Kamera.

Im Rahmen der Arbeit zur Detektion der Rehkitze mit unserem UAS haben wir eine Suchstrategie entwickelt, die wir auch dazu verwenden die Kiebitzester zu finden. **Abbildung 5** zeigt den Workflow: Der erste Schritt ist die Software-basierte Flugplanung. Die zu überfliegende Fläche wird auf einer Karte mit einem Polygon gekennzeichnet. Unsere Flugplanungssoftware (ISRAEL *et al.* 2015b) berechnet einen optimierten Flugpfad. Danach startet das UAV. Während des Überflugs wird im Sekundentakt ein Bild von der Szene aufgenommen. Die GPS-Position, die Kameraorientierung, der Aufnahmezeitpunkt und einige weitere UAV-Sensordaten werden gemeinsam mit dem Bild auf einer SD-Karte abgespeichert.

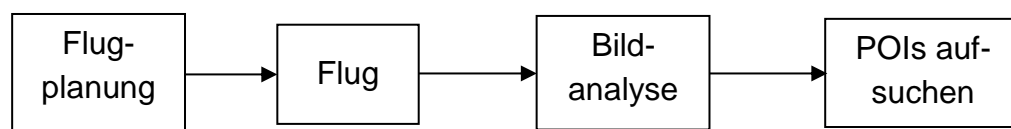


Abbildung 5: Aktueller Workflow zur Suche und Markierung von Kiebitzestern

Die Kameras sind senkrecht nach unten gerichtet und werden durch einen Gimbal stabil gehalten. Das System fliegt automatisch von Wegpunkt zu Wegpunkt, bis die Fläche vollständig erfasst wurde. Der Pilot muss nur im Notfall eingreifen. Nach dem Flug folgt der Bildanalyseschritt. Dazu wird die SD-Karte mit den Rawdaten ausgelesen. Mit Hilfe der GPS-Position, der Orientierung der Kamera und einem Höhenmodell der Szene können die interessanten Punkte (engl. Points of Interest; POIs) georeferenziert werden. Die GPS-Positionen dieser POIs werden dann auf ein Hand-GPS-Gerät übertragen. Im letzten Schritt geht eine Person mit Hilfe des GPS-Gerätes zu jedem POI. Im Falle einer korrekt positiven Klassifizierung wird das Kiebitzest mit zwei Stangen markiert (**Abbildung 1** rechts). Der Landwirt weiß damit, wo sich das Nest befindet und kann diese Stellen unbearbeitet lassen.

In ISRAEL (2015a) wurden verschiedene Suchstrategien mit dem Fokus auf praktischen Einsatz und hohe Flächenleistung miteinander verglichen. Obwohl die Strategie aus **Abbildung 5** sequentiell angelegt ist, war sie für den Fall der Rehkitzdetektion zuverlässiger und lieferte eine höhere Flächenleistung als Strategien mit paralleler Auswertung mit Hilfe von Live Monitoring und Markierung während des Fluges. Für die Kiebitznest-Detektion gibt es bisher keinen solchen Vergleich, aber es wird ein ähnliches Ergebnis erwartet.

Die Bilder von Mikrobolometer-basierten Thermalkameras sind aufgrund der fehlenden Kühlung stark fehlerbehaftet. Eine Änderung der Kameragehäusetemperatur um ein Kelvin hat beispielsweise im vorliegenden Aufbau die gleiche Auswirkung auf ein mittleres Bildpixel wie eine Änderung der Szenentemperatur um fünf Kelvin. Der Einfluss ist abhängig von der Position des Pixels. Aus diesem Grund weisen viele Thermalbilder von Mikrobolometer-basierten Kameras einen Effekt auf, der wie eine Vignettierung aussieht (siehe **Abbildung 7** links).

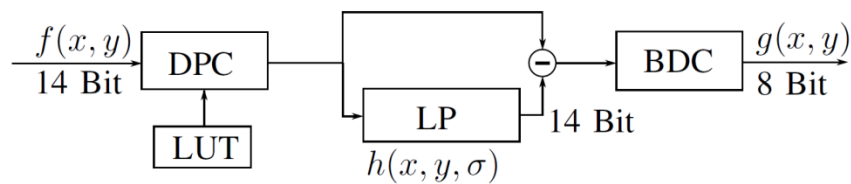


Abbildung 6: Blockdiagramm des MbOpt-Algorithmus zur Thermalbild-Vorverarbeitung (Erläuterung im Text)

Mit dem Mikrobolometer Optimierungs-Algorithmus (MbOpt, siehe **Abbildung 6**) kann der Kontrast im Thermalbild und damit die Detektierbarkeit eines Kiebitznestes deutlich erhöht werden. Das 14-Bit Rawbild wird als erstes einer Dead Pixel Correction (DPC) unterzogen. Die Information über die Position der toten Pixel kommt aus einer Lookup-Tabelle (LUT). Das DPC-gelieferte Bild wird nun mit einem Tiefpass (engl.: Lowpass, LP) mit einer Filtergröße von 147 Pixeln gefaltet. Das resultierende Bild wird subtrahiert von dem DPC-gelieferten Bild. Die Farbtiefe des Ausgangsbildes wird dann durch die Bit Depth Compression (BDC) linear auf 8-Bit komprimiert. Der Gradientenverlauf ist im Ausgangsbild bei den meisten Bildern nicht mehr zu erkennen (siehe **Abbildung 7** rechts).

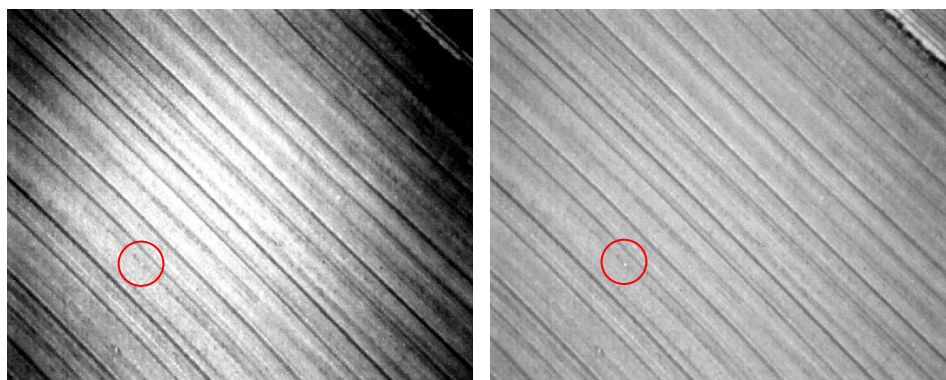


Abbildung 7: Thermalbild einer Agrarfeld-Szene aus 50 m Flughöhe mit einem schwierig zu detektierendem Kiebitznest. Links ist das unbearbeitete Bild des Analogausgangs der IR-Kamera zu sehen. Rechts wurden die Rawdaten des Bildes mit dem MbOpt-Algorithmus prozessiert. Der rote Kreis markiert das Kiebitznest.

3 Ergebnisse und Diskussion

An sechs verschiedenen Tagen haben wir an drei verschiedenen Standorten 17 Flüge durchgeführt und dabei 15 Nester detektiert. Die ersten neun Flüge (Mns1-Mns9) wurden am 17. und 18. April 2015 in der Nähe von Münster in Zusammenarbeit mit der Nabu Naturschutzstation Münsterland durchgeführt. Hausen (Hsn1 und Hsn2) war der zweite Standort, 40 km westlich von München. Am 2. Mai 2015 fanden dort zwei Flüge. Der dritte Standort war in der Nähe von Wasserburg (Wsb1-Wsb6). In Zusammenarbeit mit der unteren Naturschutzbehörde Rosenheim wurden dort im Jahr 2015 und 2016 Flüge durchgeführt. Die Flüge erfolgten in verschiedenen Höhen zwischen 30 und 80 Meter. Die aufgenommenen Bilder hatten eine Überlappung von 30% quer zur Flugrichtung. Entlang der Flugrichtung variierte die Überlappung zwischen 30% und 95%. **Abbildung 8** zeigt die beiden Flugpfade Mns8 (grün) und Mns 9 (blau). Die grünen und blauen Punkte markieren die UAV-Positionen zum Zeitpunkt der Aufnahme eines Fotos. Die pinken Punkte markieren die aus den jeweiligen Bildern rückprojizierte Position der beiden Kiebitznester 8 und 9. Aufgrund fehlender Passpunkte und zu wenigen Verknüpfungspunkt-Merkmalen in den Thermalbildern kann die indirekte Georeferenzierung mit einem Bündelblockausgleich, wie in der Luftbildphotogrammetrie üblich (KRAUS 2004), hier nicht angewendet werden. Des-



Abbildung 8: Der Flugpfad von zwei UAV-Flügen. Hier wurden zwei Kiebitznester (pinke Punkte) gefunden (Hintergrundbild: Google Maps / Digital Globe 2017).

halb wird die direkte Georeferenzierung aus (ISRAEL 2015b) verwendet. Die Abweichung der Kiebitznest-Fundstellen liegt bei einer Flughöhe von 40 m bei maximal 5 m.

Zunächst musste die Frage geklärt werden, ob man Kiebitznester mit einer Thermalkamera überhaupt finden kann. Aus diesem Grund wurde ein Feld ausgesucht, auf dem ein Kiebitznest bereits mit der klassischen Methode gefunden und mit Stäben markiert wurde. Wie erwartet flog der Vogel davon, als sich das UAV dem Nest näherte. Aus 30 m Flughöhe konnte das Nest eindeutig detektiert werden. Mit dem 19 mm Objektiv, das ein horizontales Gesichtsfeld von ca. 32° besitzt, wurde das Nest dabei auf ca. 4x4 Pixel abgebildet. Die Eier waren ca. 10 K wärmer als ihre Umgebung. Etwa drei Minuten nachdem das UAV gelandet war, saß der Vogel wieder auf dem Nest.

Der nächste Flug wurde auf einem Feld durchgeführt, auf dem ein Kiebitznest vermutet, dieses aber noch nicht markiert wurde. Da die Sonne bereits unterging, war die Detektion auf dem Thermalbild noch einfacher als beim Feld zuvor. Im Gegensatz zur IR-Kamera ist es allerdings sehr schwierig, das Nest auf den Bildern der GoPro-Kamera zu entdecken. **Abbildung 9** zeigt die Bilder der IR- und VIS-Kamera von diesem Kiebitznest. Es hat sich auch bei den weiteren Versuchen gezeigt, dass Kiebitznester bei schwacher Bestrahlungsstärke der Sonne mit Hilfe einer Thermalkamera sehr einfach detektiert werden können. Eine schwache Bestrahlungsstärke besteht beispielsweise bei bedecktem Himmel oder nach Sonnenuntergang.

Der MbOpt-Algorithmus konnte den Kontrast in den Thermalbildern, abhängig von Kameragehäuse-Temperatur-Drift, zwischen 10 und 50% verbessern. Dabei wurde der Unterschied zwischen der gemessenen maximalen Nest-Temperatur und der Durchschnittstemperatur der Nestumgebung vor und nach Anwendung des MbOpt-Algorithmus verglichen.

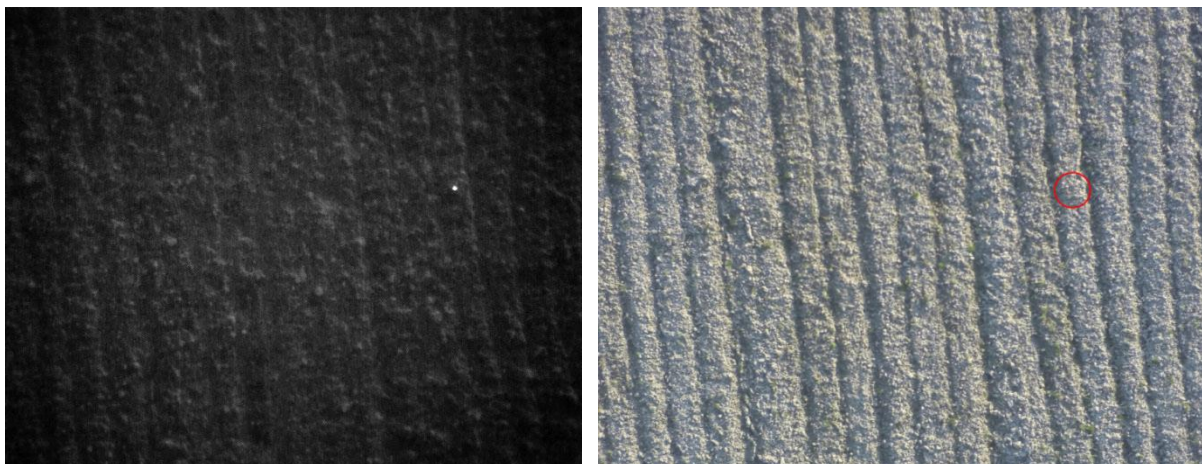


Abbildung 9: IR- und VIS Bild von einer Szene mit einem Kiebitznest (roter Kreis) aus 30 m Flughöhe.

In **Abbildung 10** sind die maximalen Temperaturen T_{nest} der Nester in rot gezeigt. In grün ist die Durchschnittstemperatur T_{sur} eines 2-4 Pixel breiten Rings um das jeweilige Nest angetragen. Die Differenztemperatur $\Delta T = T_{\text{sur}} - T_{\text{nest}}$ ist in blau angetragen. Obwohl die Kamera radiometrisch kalibriert ist, sind die Absolut-Temperaturen stark fehlerbehaftet. Das liegt unter anderem an der Bewegungsunschärfe aufgrund der festen Integrationszeit von ca. 15 ms des Vanadium Oxid basierten Focal Plane Arrays der Thermalkamera (ISRAEL 2015). Die Nester, bei denen $\Delta T > 5$ K gemessen wurde, konnten sehr leicht detektiert werden. Geringere Differenztemperaturen wurden entweder bei Flughöhen über 50 m oder bei sehr hoher Bestrahlungsstärke der Sonne ($E > 600 \frac{W}{m^2}$) gemessen. Weiteres zu den Kampagnen ist in (ISRAEL 2017) zu finden.

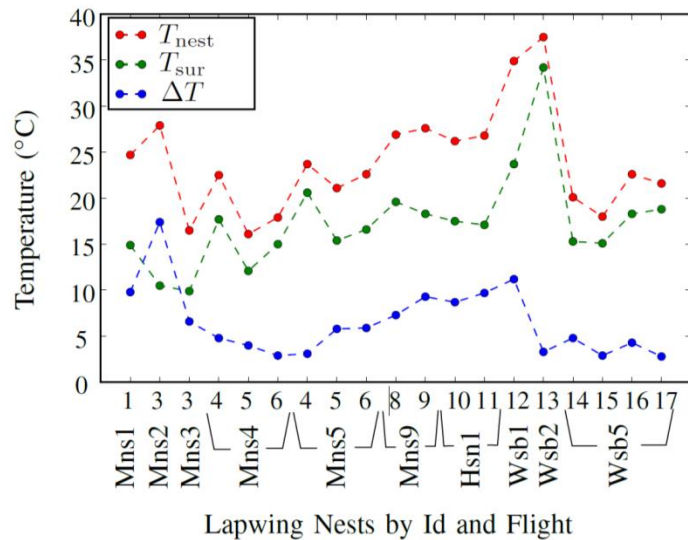


Abbildung 10: Die Temperaturen der gefundenen Kiebitznester und deren Umgebungstemperatur. Die Maximaltemperaturen des Nests sind in rot angetragen, die durchschnittliche Umgebungstemperatur in grün. Die blaue Kurve zeigt die Differenz der beiden Werte.

Obwohl die vom Brutvogel verlassenen Nester nachts an kalten Tagen am leichtesten detektiert werden könnten, ist dies kein günstiger Messzeitpunkt, denn die Eier kühlen dann sehr schnell unter die kritische physiologische Null-Temperatur bei ca. 25°C (LISLEVAND 2001) ab. An kalten Tagen sollte eine Fläche aus diesem Grund auch nicht mehrmals hintereinander überflogen werden. Der Flug Mns3 wurde nach Sonnenuntergang 39 Minuten nach dem Flug Mns2 durchgeführt. In dieser Zeit kühlte das Nest um 11,4 K ab. Am nächsten Tag saß kein brütender Vogel mehr auf dem Nest. Es ist leider nicht unwahrscheinlich, dass dieser zweite Flug dafür verantwortlich war.

Hohe Flächenleistung ist deshalb, wie auch bei der Rehkitzsuche, von hoher Bedeutung bei der Kiebitznest-Suche. Sie wird erreicht durch große Flughöhe und große Geschwindigkeit. Beide Missionsparameter führen zu geringerem Kontrast im Thermalbild und dadurch zu schlechterer Detektierbarkeit der Kiebitznester. Ein guter Kompromiss liegt für die verwendete Kamera bei ca. 40 m Flughöhe mit einer durchschnittlichen Fluggeschwindigkeit von 2,5 m/s. Damit erreicht man eine Flächenleistung von ca. 3 ha/Flug.

Literaturverzeichnis

- CHABOT D., BIRD D.M. (2012):** *Evaluation of an off-the-shelf unmanned aircraft system for surveying flocks of geese.* Waterbirds, 35(1):170–174.
- HAVENS K.J., SHARP E.J. (1998):** *Using thermal imagery in the aerial survey of animals.* Wildlife Society Bulletin, pages 17–23.
- ISRAEL M. (2015a):** *Entwicklung eines UAV-basierten Systems zur Rehkitzsuche und Methoden zur Detektion und Georeferenzierung von Rehkitzen in Thermalbildern: Der Fliegende Wildretter.* PhD thesis, Universität Osnabrück.
- ISRAEL M., MENDE M., KEIM S. (2015b):** *UAVRC, a generic MAV flight assistance software.* International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W4:287–291.
- ISRAEL M. (2017):** *Detecting nests of lapwing birds with the aid of a small unmanned aerial vehicle with thermal camera.* In 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, submitted.
- KRAUS K. (2004):** *Photogrammetrie.* Band 1. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- LISLEVAND T. (2001):** *Male incubation in northern lapwings: effects on egg temperature and potential benefits to females.* Ornis Fennica, 78:23–29.
- PEACH W.J., THOMPSON P.S., COULSON J.C. (1994):** *Annual and long-term variation in the survival rates of british lapwings vanellus vanellus.* Journal of Animal Ecology, pages 60–70.
- SCHIFFERLI L., SPAAR R., KOLLER A. (2006):** *Fence and plough for lapwings: Nest protection to improve nest and chick survival in swiss farmland.* Osnabrücker Nat. wiss. Mitt, 32:123–129.
- WIMMER T., ISRAEL M., HASCHBERGER P., WEIMANN A. (2013):** *Rehkitzrettung mit dem fliegenden Wildretter: Erfahrungen der ersten Feldeinsätze.* In 19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, number 81, pages 85–95.

Erfassung des realen Messerzustandes von selbstfahrenden Feldhäckslern unter Verwendung automatisierter Bildauswertung

Detection of the Real Knife Condition of Self-Propelled Forage Harvesters by Automated Image Analysis

Manuel Schneider¹, Martin Schweigel¹, Christian Walther^{1/2}, Luise Merbach¹, Sebastian Hartwig³, Andreas Wenzel^{1/2}, Frank Beneke³, Jochen Huster⁴

¹ Hochschule Schmalkalden, Forschungsgruppe Eingebettete Diagnosesysteme, Blechhammer 4-9, 98574 Schmalkalden

² Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Am Vogelherd 50, 98693 Ilmenau

³ Georg-August-Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Agrartechnik, Gutenbergstraße 33, 37075 Göttingen

⁴ CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Vorentwicklung, Mühlenwinkel 1, 33428 Harrewinkel

E-Mail: m.schneider@hs-sm.de, m.schweigel@hs-sm.de

Zusammenfassung: Der Zustand der Messerschneiden in selbstfahrenden Feldhäckslern beeinflusst in hohem Maße die Qualität des Erntegutes und die Energieeffizienz des Ernteprozesses. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde ein computergestütztes Verfahren zur Erfassung des tatsächlichen Zustandes der Messerschneiden entwickelt und getestet. Der Fokus dieses Beitrages liegt in der Vorstellung einer Mess- und Auswertungsmethode für die Bestimmung des Messerverschleißes, der während des Ernteprozesses auftritt. Hierfür wurden im Ernteverlauf Duplikate der im Häcksler eingebauten Messerschneiden angefertigt, welche im Nachgang mittels Photogrammetrie und automatisierter Bildauswertung untersucht wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden mit statistischen Verfahren aufbereitet und dargestellt. Des Weiteren wird ein Ansatz zur Bewertung des Verschleißzustandes der Messerschneiden von Feldhäckslern vorgestellt. Durch die beschriebene Vorgehensweise können in Abhängigkeit des Erntegutes unterschiedliche Verschleißerscheinungen an der Messerschneide nachgewiesen werden.

Deskriptoren: Photogrammetrie, Streifenlichtprojektion, Bildanalyse, Messerverschleiß, Feldhäcksler

Abstract: *The condition of the cutting edges in self-propelled forage harvesters is decisive for the quality of the crop material and energy efficiency of the harvesting process. Within a research project a computer-aided method for the monitoring of the condition of the cutting edges was developed. The focus of this contribution is the presentation of a measurement method for the determination of the knife wear, which were used during*

the harvesting process. During the harvesting process duplicates of the used cutting edges were produced. Subsequently, these duplicates were examined by means of photogrammetry and automated image analysis. The results of this study are presented according to statistical methods. An approach for evaluation of the wear models of knife edges from forage harvesters is introduced. Furthermore, it can be shown that different wear phenomena occur at the cutting edge as a function of the crop material.

Keywords: *photogrammetry, fringe projection, image analysis, blades wear, forage harvester*

1 Einleitung

Bei der Ernte von Mais-, Gras- und Ganzpflanzensilage als Biogassubstrat oder Futtermittel wird hauptsächlich die erreichte Häckselqualität als Bewertungskriterium für die Prozessqualität herangezogen. Beispielsweise werden je nach Verwendung des Ernteguts längere oder kürzere Häcksellängen mit mehr oder weniger zerfaserter Schnittkante gefordert. Um die Häckselqualität entsprechend der Verwendungsgebiete anpassen zu können, werden beispielsweise die Betriebsparameter Trommeldrehzahl, Schneidspalt, Bodenabstand Vorsatz, Drehzahl Einzugswalzen, Vorpressdruck und Fahrgeschwindigkeit vom Häckslersfahrer nach subjektivem Empfinden und Erfahrung abhängig von Erntegut und –bedingungen eingestellt.

Des Weiteren stellt der Energieverbrauch eine weitere Messgröße dar. Die Zerkleinerung von Erntegut in einem selbstfahrenden Feldhäcksler ist ein energetisch aufwendiger Prozess. Um die geforderte Häckselqualität über den gesamten Ernteprozess bei gleichzeitig vertretbarem Energieaufwand gewährleisten zu können, sind Messer mit einem hinreichenden Schärfegrad notwendig. Bedingt durch den während des Ernteprozesses auftretenden Verschleiß verändert sich die Schnittqualität. Zugleich steigt der Kraftbedarf für das Zerkleinern mit zunehmend stumpferen Messern an. Diese im Ernteprozess auftretenden Verschleißerscheinungen sind von den gewählten Betriebsparametern, den Ernteguteigenschaften und den Erntebedingungen abhängig. Für eine gezielte Beeinflussung des Häckselprozesses muss zu jedem Zeitpunkt des Prozesses der Zustand der Messer bekannt sein. Dies ist heute noch nicht möglich. Inhalt dieses Beitrags ist daher die Vorstellung einer Mess- und Auswertungsmethode für die Bestimmung des tatsächlichen Messerzustandes während des Ernteprozesses.

Die in der Literatur beschriebenen Messgrößen zur Verschleißbestimmung, können in direkt und indirekt messbare Größen eingeteilt werden. Die indirekten Methoden wurden aus ROUSEK *et al.* (2009) entnommen. Die direkt messbaren Größen können nach KOVAC *et al.* (2011) in mit und ohne Berücksichtigung der Messergeometrie unterschieden werden. In **Abbildung 1** werden die verschiedenen Messgrößen in die zugehörigen Kategorien eingeteilt.

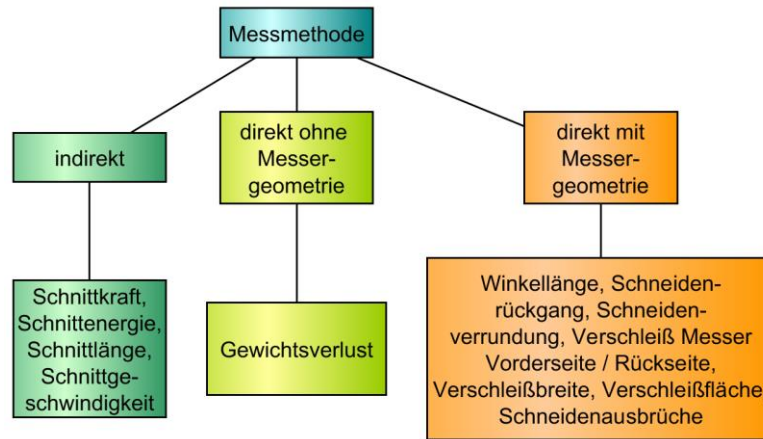


Abbildung 1: Einteilung der verschiedenen Messgrößen zur Verschleißbestimmung an Messerschneiden anhand der Messmethode. (nach ROUSEK *et al.* (2009), KOVAC *et al.* (2011))

Die Nutzung von indirekten Messgrößen oder direkten Messgrößen ohne Bezug zur Schneidengeometrie für die Bestimmung des Verschleißzustandes ist bei Feldhäckslern aufgrund der Komplexität des Schneidsystems und der Vielfältigkeit der wirkenden Einflussparameter und Störgrößen nicht anwendbar. Die Erfassung und Vermessung der Messergeometrie ist die zuverlässigste Variante, um den Verschleißverlauf von Häckselmessern im laufenden Ernteprozess bestimmen zu können. Die verschiedenen direkt messbaren Verschleißgrößen mit Berücksichtigung der Messergeometrie werden in **Abbildung 2** anhand einer Skizze veranschaulicht.

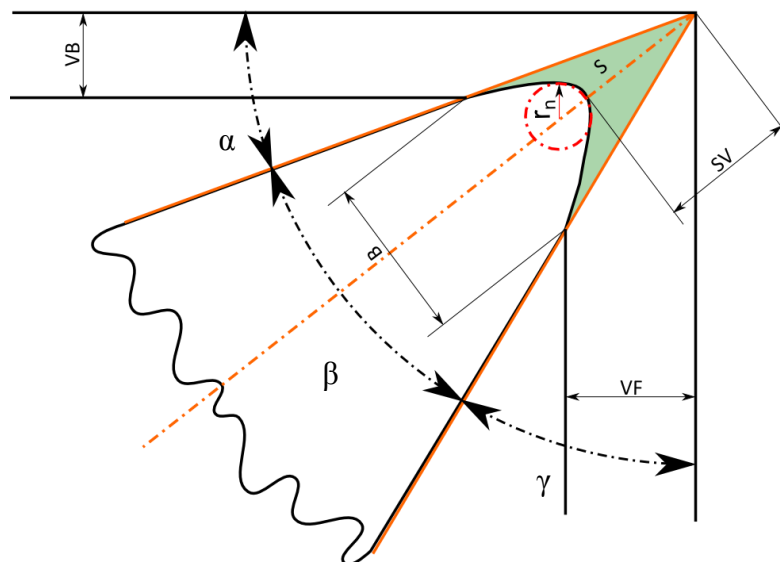


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Verschleißformen an der Schneidkante. α – 1. Freiwinkel, β – Keilwinkel, γ – 2. Freiwinkel, SV – Schneiderrückgang, VF - Verschleiß an der Vorderseite, VB - Verschleiß an der Rückseite, r_n – Schneiderrundung, B – Änderung der Schneidenbreite, S – Verschleißfläche (vgl. KOVAC *et al.* 2011)

Für die direkte Erfassung der Schneidengeometrie unter Feldbedingungen wurde ein angepasstes Abdruckverfahren, welches im Abschnitt 2 näher erläutert wird, angewendet. Die damit erzeugten Messerabdrücke werden im Nachgang im Labor mittels berüh-

rungsloser 3D-Oberflächenerfassung digitalisiert und mit computergestützter Bildauswertung untersucht. In der Arbeit von JAHR *et al.* (2012) wird eine ähnliche Methode für die Messung einer echten Klinge eingesetzt. Das beiden Methoden zugrunde liegende Messverfahren arbeitet unter Verwendung der optischen Triangulation. Somit können 3D-Informationen mit Hilfe eines Kamerasystems und einer Streifenmusterprojektion errechnet werden. Die erarbeitete Methodik für die Verschleißbestimmung wird am Beispiel einer im Mai 2016 durchgeführten Erntefahrt im folgenden Abschnitt erläutert.

2 Methode und Datenbasis

Für die Erfassung des Schneidenschleißes unter realen Prozessbedingungen ist eine angepasste Analysemethodik entwickelt worden. Dafür wurde über mehrere Tage hinweg Gras gehäckselt, welches in nachfolgenden Verarbeitungsschritten einsiliert wurde. Im Ernteverlauf wurden die wichtigsten Erntedaten, wie Durchsatz des Häckslers, Ertrag, abgeerntete Fläche und Erntemenge erfasst. In definierten Zeitabständen bzw. nach einer definierten Durchsatzmenge wurden bei Stillstand des Häckslers Abdrücke (Negative) einzelner Messer für die spätere Analyse im Labor angefertigt. Nach den Erntefahrten wurden die nun zur Verfügung stehenden Negativ-Abdrücke der Messer mittels eines 3D-Messverfahrens digitalisiert. Auf Basis dieser digitalen Daten wurde für jeden Messerabdruck die Veränderung der Schneide gegenüber geschliffenen Messern mittels Bildauswertung beschrieben. Über eine abschließende Datenanalyse können ausgewählte Parameter des Messerzustands über den Ernteverlauf betrachtet werden. Die vier Hauptphasen dieser Analysemethodik werden in **Abbildung 3** dargestellt und in den folgenden Abschnitten näher erläutert.



Abbildung 3: Darstellung der 4 Hauptbestandteile der durchzuführenden Messstrategie für die Bestimmung des Schneidenschleißes unter Feldbedingungen.

Datenbasis

Während der Durchführung der Erntefahrten bei der Grasernte vom 09.05.2016 bis 11.05.2016 ist ein selbstfahrender Feldhäcksler der Firma CLAAS vom Typ Jaguar 960 zum Einsatz gekommen. Der Feldhäcksler war mit je 12 Messern auf zwei Messerreihen bestückt, somit wurde mit 24 Messern gehäckselt. Die Fahrten erstreckten sich über drei Erntetage bei sonnigen und trockenen Witterungsbedingungen. Während der Erntefahrten wurden jeweils Abdrücke eines Messers der linken und der rechten Messerreihe angefertigt und für die spätere Analyse archiviert. In **Tabelle 1** sind die Zeitpunkte der Messerabdrucknahme gelistet.

Tabelle 1: Zeitpunkte der erstellten Messerabdrücke (Messwerte – MW) für die drei aufeinanderfolgenden Erntetage der Grasernte. Neben den Daten zu Durchsatz, Ertrag, Erntefläche und Erntemenge werden auch die generierten Produkte (Futtersilage (FS) und Biogas (BG)) aufgeführt.

Erntetag	Abdruck-Nr.	Durchsatz (t/h)	Ertrag (t/ha)	Erntefläche (ha)	Erntemenge (t)	Produkt
	(hh:mm)	(MW, ohne Stillstand)	(MW, ohne Stillstand)	Δ (Σ)	(MW)	(FS/BG)
1.	1 (08:30)	0	0	0	0	-
	2 (11:30)	99,85	16,19	2,07 (2,07)	33,51	FS
	3 (12:50)	109,42	18,83	1,85 (3,92)	34,84	FS
	4 (15:38)	102,24	18,44	3,67 (7,59)	67,67	FS
	5 (10:22)	76,33	14,69	2,16 (9,75)	31,73	FS
2.	6 (11:35)	121,58	25,26	1,97 (11,72)	49,76	FS
	7 (12:45)	119,25	21,48	1,45 (13,17)	31,15	FS
	8 (14:20)	114,95	22,24	1,92 (15,09)	42,70	FS
	9 (16:50)	37,99	9,79	2,00 (17,09)	19,58	BG
	10 (18:09)	46,61	11,07	3,20 (20,29)	35,42	BG
3.	11 (10:09)	109,10	21,53	2,86 (23,15)	61,58	FS
	12 (11:37)	119,34	27,10	1,99 (25,14)	53,93	FS
	13 (13:50)	117,04	40,72	2,06 (27,20)	83,88	FS

Über den Ernteverlauf wurde die Abdrucknahme des jeweiligen Messerzustandes nach zirka 2 ha Erntefläche angestrebt. Dabei mussten jedoch grundlegende Arbeitsabläufe berücksichtigt werden, wie beispielsweise der Abtransport des Ernteguts, um nicht zu lange Stillstandzeiten des Feldhäckslers zu verursachen. Über die Telemetrie-Daten des Feldhäckslers wurden zusätzliche Werte zu Durchsatz, Ertrag und Erntemenge gewonnen. Diese Daten werden in **Tabelle 1** jeweils punktuell zu den Intervallen zwischen den Zeitpunkten der Messerabdrucknahme angegeben.

Abdruckverfahren

Ziel des Abdruckverfahrens ist die Dokumentation des Zustandes der Schneiden eines Feldhäckslers zu einem definierten Zeitpunkt. Hierdurch wird der jeweilige Schneidenzustand für die messtechnische Auswertung im Labor konserviert. Um Kopien mit möglichst geringer Abweichung zum Originalmesser herstellen zu können, benötigen die auf dem Feld erstellten Negativformen eine hohe Genauigkeit. Das konnte mit einem additionsvernetzenden Silikon aus der Dentaltechnik erreicht werden. Das verwendete

Zwei-Komponenten-Silikon besitzt nach den technischen Angaben eine Detailwiedergabe von $<1,5 \mu\text{m}$. Für das leichtere Anfertigen der Abdrücke wurden angepasste Kunststoffformen mittels 3D-Druck hergestellt.

Die Abdrucknahme erfolgt auf dem Feld immer an einem vorher festgelegten Messer von einer Wartungsöffnung des Häckslers aus. Um eine Verfälschung der Ergebnisse zu vermeiden, wird das Messer vor der Abdrucknahme von Ernterückständen befreit. Für die Negativabdrücke wurde der äußere Bereich der Messer gewählt, da hier der größte Verschleiß vermutet wird (siehe **Tabelle 1**).

Das aus vorportionierten Komponenten gemischte Abdruckmaterial wird in die Kunststoffformen gegeben, um ein gleichmäßiges Andrücken der Schneiden in die Abformmasse zu gewährleisten. Nach Aushärten wird die Abdruckmasse von der Schneide gelöst und der Abdruck dokumentiert. (HARTWIG 2016)

Die vorhandene Abdruckform des Messers wird nachträglich im Labor optisch vermessen und in eine digitale Kopie der Schneidengeometrie überführt. Das Originalmesser des Häckslers wird durch das Kopierverfahren nicht verändert und muss nicht aus dem Häckler ausgebaut werden.



Abbildung 4: Abdrucknahme an einem Feldhäckslers. (HARTWIG 2016)

3D Abtastung

Das im Abschnitt 1 beschriebene Verfahren für die dreidimensionale Abtastung von Geometrien, hat sich als sehr gut geeignetes Messverfahren für die Untersuchung der Schneidenabdrücke herausgestellt. In **Abbildung 4** ist ein vereinfachter schematischer Aufbau eines solchen optischen Messplatzes dargestellt.

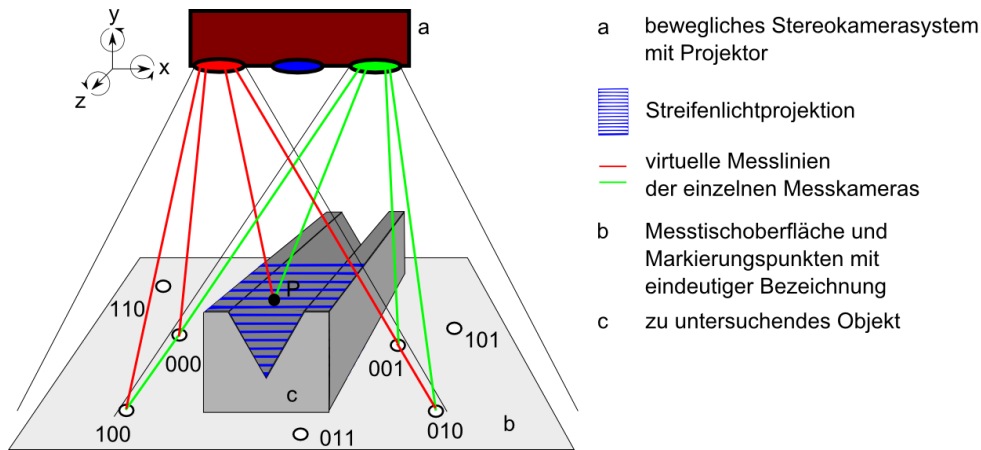


Abbildung 5: Schematische Darstellung des berührungslosen optischen 3D-Messverfahrens für die Untersuchung von Abdrücken der Schneidengeometrie. (vgl. GOM (2016))

Um eine Vermessung der berechneten 3D-Punktwolke durchführen zu können, ist eine für das System angepasste Auswertesoftware erforderlich, welche die Systemparameter und die eindeutig bekannten Bezugspunkte verwenden kann. Die Bezugspunkte werden in **Abbildung 5** als nummerierte Kreise dargestellt. Die Bestimmung der Winkel zu den einzelnen auf der Messoberfläche angebrachten Messpunkten ermöglicht eine genaue Positionsbestimmung des Kamerasystems zur Messoberfläche. Des Weiteren werden für eine präzise Messung exakte Kenntnisse der inneren geometrischen Anordnung des Kamerasystems benötigt. Die beiden Gegebenheiten werden nach GÜHRING (2002, S. 26) als innere und äußere Orientierung des Kamerasystems bezeichnet. Die 3D-Informationen des zu untersuchenden Objekts werden mittels Streifenlichtprojektion in mehreren Messschritten bestimmt und in Punktwolken umgewandelt. Diese Punkte erzeugen das digitalisierte 3D-Objekt in der Auswertesoftware. Größere Bauteile, bei denen mehreren Messungen erforderlich sind, werden mit Hilfe der Auswertesoftware anhand der Positionsmarken zusammengesetzt. Für den mathematischen Zusammenhang zwischen den zu erfassenden 3D-Objektkoordinaten und den digitalisierten 2D-Bildkoordinaten werden Kollinearitätsgleichungen (siehe Gl. 1) verwendet.

$$x = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = -c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
(1)

Hier bei bilden die Elemente r_{ij} eine räumliche Drehmatrix \mathbf{R} , welche die folgenden Eigenschaften besitzen $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}$ und $\det(\mathbf{R}) = 1$. Die Koordinaten (X_0, Y_0, Z_0) geben die Position des Projektionszentrums im übergeordneten System der jeweilig verwendeten Kamera an (GÜHRING 2002, S.30). Zur Berechnung der 3D-Koordinaten $P = (X, Y, Z)$ aus den Bildkoordinaten (x, y) muss das Gleichungssystem gelöst werden. Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung des Kamerasystems und mit der Verwendung von mehreren Messbildern, kann mit Gl. 1 der Punkt P bestimmt werden. Eine detaillierte

Beschreibung der mathematischen Zusammenhänge kann in GÜHRING (2002) gefunden werden. Die Berechnung der Objektpunkte wird für alle im Projektionsweg sichtbaren Bildpunkte wiederholt und ermöglicht die Rekonstruktion der 3D-Geometrie mittels Punktwolken. Die Vorteile dieses Digitalisierungsverfahrens sind die hohe Genauigkeit, relativ geringe Abtastzyklen und die automatisierte Rekonstruktion der Bauteilgeometrie. Die digitalisierten Objekte können mit computergestützten Auswertelgorithmen analysiert und ausgewertet werden. Somit steht zur Auswertung der Schneidengeometrie eine zerstörungsfreie Analysemethode zur Verfügung. Für die 3D-Vermessung der Abdrücke wurde eine ATOS ScanBox 4105 mit einem 3D-Scanner vom Typ ATOS Core 135 eingesetzt. Das mit einem Scan abtastbare Messvolumen beträgt 135 x 100 x 100 mm. **Abbildung 6** veranschaulicht den verwendeten Messaufbau.



Abbildung 6: (von links beginnend) Photographie der verwendeten ATOS Scan-Box 4105 mit dazugehörigem Messplatz für die Programmierung und Einstellung des Roboterarms. Als nächstes ist die montierte Probenhalterung der Schneidenabdrücke auf dem Drehtisch abgebildet.

Mit diesem Messverfahren ist die vollautomatische Digitalisierung eines Abdruckes möglich. Der Maschinenbediener wird lediglich für das Wechseln des Abdruckes und das Starten eines neuen Messvorgangs benötigt. Die gerätespezifische Software GOM Inspect (Build 2017-01-13) dient als Analyseschnittstelle für die Auswertung der digitalisierten Schneidenabdrücke. Das Resultat eines digitalisierten Schneidenabdrucks ist in **Abbildung 7** dargestellt. Weitere Resultate zu diesem Auswerteprozesse werden im Abschnitt 3 näher erläutert.

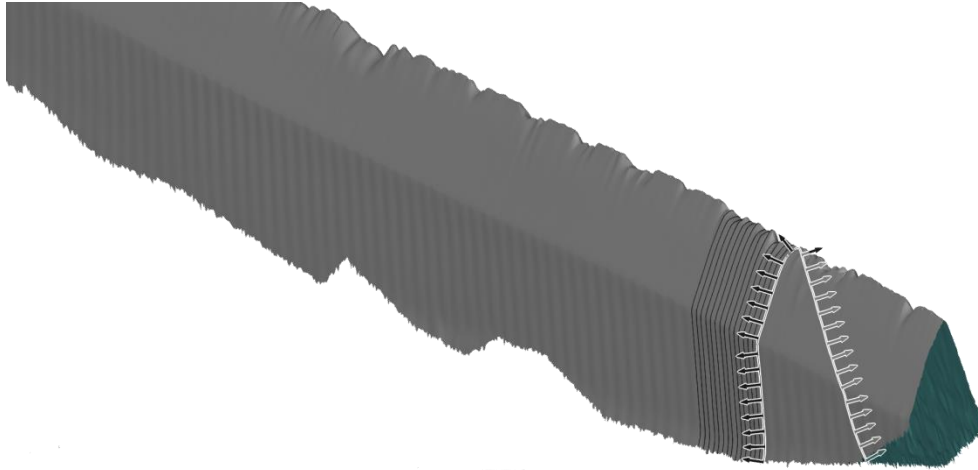


Abbildung 7: Darstellung des digitalisierten Schneidenausschnittes (Abdruck-Nr. 13, **Tabelle**) der durchgeführten Erntefahrt. Die eingezeichneten Linien veranschaulichen die Segmentierung der Querschnittselemente und werden für die nachfolgenden Untersuchungen der Schneidkante benötigt.

Segmentierung und Bildauswertung:

Damit eine adäquate Aussage über den Verschleißzustand der Schneide abgeleitet werden kann, ist eine Segmentierung der rekonstruierten Schneidengeometrie erforderlich. Hierfür werden die Querschnittskonturen der digitalisierten Abdrücke in äquidistanten Abständen erfasst und als Schnittebenen fortlaufend gespeichert. Der Abstand zwischen zwei Querschnittsebenen kann in der Software eingestellt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung beziehen sich auf einen eingestellten Abstand von 1 mm. In **Abbildung 7** sind einige Querschnittssegmente der Schneidenabdrücke abgebildet.

Durch die Verwendung der Bildanalyse-Software Halcon (HDevelop Version 12.0.2) der Firma MVTec Software GmbH können die erzeugten Querschnittskonturen computer-gestützt auf ihre geometrischen Eigenschaften untersucht werden. In **Abbildung 8** wird der Ablaufplan für die halbautomatische Analyse aller Querschnittsflächen eines Schneidenabdrucks dargestellt.

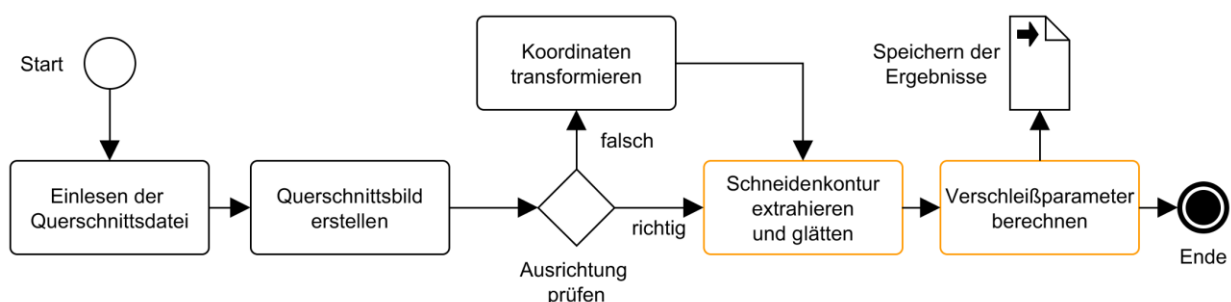


Abbildung 8: Ablaufplan zur Berechnung von Verschleißparametern anhand der Analyse von Querschnittsflächen digitalisierter Schneidenabdrücke.

Die zwei orange markierten Prozesse erfordern den meisten Rechenaufwand und werden nachfolgend näher erläutert: Das angewendete Verfahren zur Extraktion der

Schneidenkontur kann wie in **Abbildung 1** beschrieben, als direkte Messmethode mit Berücksichtigung der Schneidengeometrie betrachtet werden. **Abbildung 9** zeigt eine Skizze einer extrahierten Querschnittsebene eines Schneidenabdruckes.

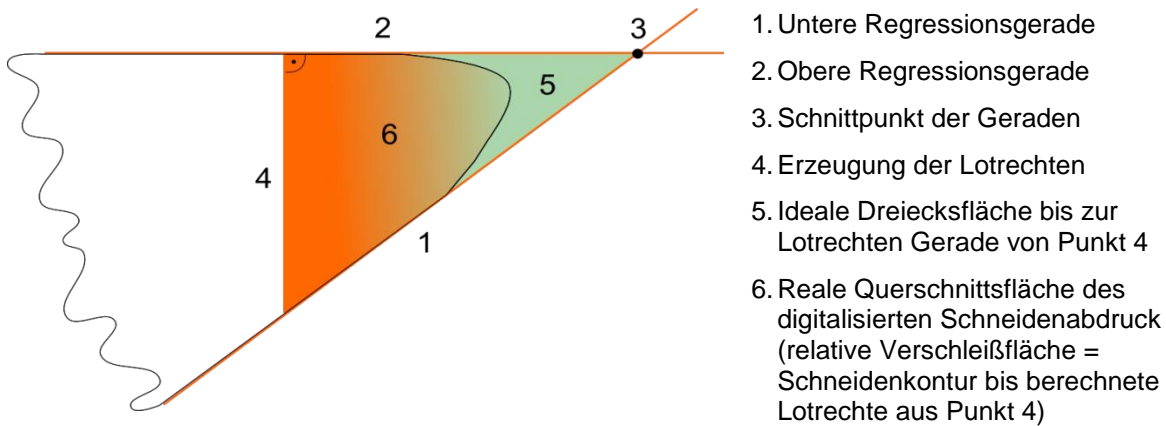


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer Querschnittsebene eines Schneidenabdruckes und Veranschaulichung der einzelnen Teilfunktionen zur Bestimmung der Verschleißparameter.

Der entwickelte Algorithmus zur Berechnung der Verschleißparameter kann in 6 Teilfunktionen geteilt werden: Der erste Schritt besteht darin, die untere Regressionsgerade (1) an der Querschnittskontur bestimmen zu können. Im Nachgang kann die obere Regressionsgerade des gehärteten Schneidenrückens (2) bestimmt werden. Beide Geraden besitzen einen Schnittpunkt (3), welcher als Bezugspunkt für die Bestimmung einer lotrechten Gerade (4) entlang der Schneidengeometrie verwendet wird. Das so entstehende rechtwinklige Dreieck (5), wird für die Differenzbildung zwischen Schneidenfläche (6) und Dreiecksfläche (5) verwendet. Das konstruierte ideale Dreieck kann jedoch nicht verallgemeinert angenommen werden, da der Winkel allgemeinen Fertigungstoleranzen unterliegt und abhängig vom Erntegut und anderen Betriebsparametern angepasst wird.

Datenanalyse

Für die Aufgaben der Datenanalyse wurde das freie Softwarepaket Scilab in der Version 5.4.1 eingesetzt. Es ermöglicht unter Verwendung eigenentwickelter Skripte eine automatisierte Verarbeitung, Auswertung und Darstellung der berechneten Verschleißparameter. Die Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

3 Ergebnisse

Die Auswertung der durchgeführten Erntefahrten wird in mehreren Schritten durchgeführt. Als Erstes erfolgt die Datenauswertung mit Hilfe der 3D-Rekonstruktionssoftware der Firma GOM. Hiermit wird eine Einzelsichtung der Schneidengeometrien vorgenommen. Im oberen Teil der **Abbildung 10** ist der Abdruck mit der Nummer 1 dargestellt. In

der Mitte ist der gleiche Bereich des Abdrucks 13 abgebildet. Um einen besseren Vergleich zwischen beiden Messerabdrücken erreichen zu können, kann eine Falschfarbendarstellung die Unterschiede hervorheben. Das erzeugte Differenzbild ist im unteren Abschnitt der **Abbildung 10** aufgeführt.

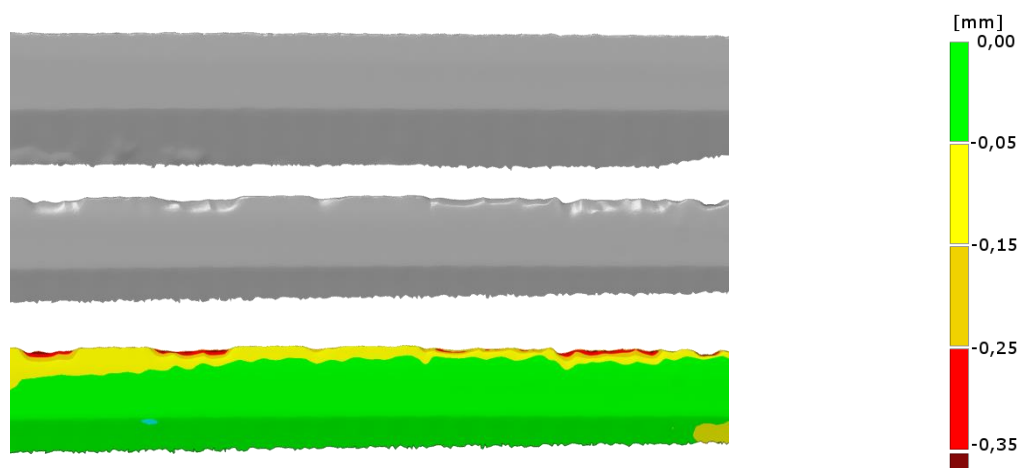


Abbildung 10: Darstellungen zweier digitalisierter Schneidenausschnitte aus der durchgeführten Gras-Ernte. Im oberen Teil ist die Ursprungsschneide ohne Verschleiß abgebildet. Die im mittleren Bildbereich dargestellte Schneide entspricht dem Schneidenzustand nach 27,2 ha Erntefläche. Die untere Grafik zeigt ein Flächendifferenzbild zwischen oberer und mittlerer Schneidengeometrie, die Farben entsprechen der jeweiligen Abweichung vom Ursprungszustand in mm (siehe Legende rechts).

Für eine große Anzahl an Schneidenabdrücken wird dieses Verfahren jedoch nur punktuell zum Einsatz kommen. Die eigentliche Untersuchung der Querschnittsflächenunterschiede wird mit dem Programm Scilab durchgeführt. Es ermöglicht eine schnelle Auswertung der berechneten relativen Flächenabnahme und der Darstellung der statistischen Eigenschaften über den gesamten Schneidverlauf. In **Abbildung 11** ist eine invertierte dreidimensionale Darstellung der relativen Flächenänderung über der digitalisierten Messerklinge und entsprechenden Abdrucknummer dargestellt.

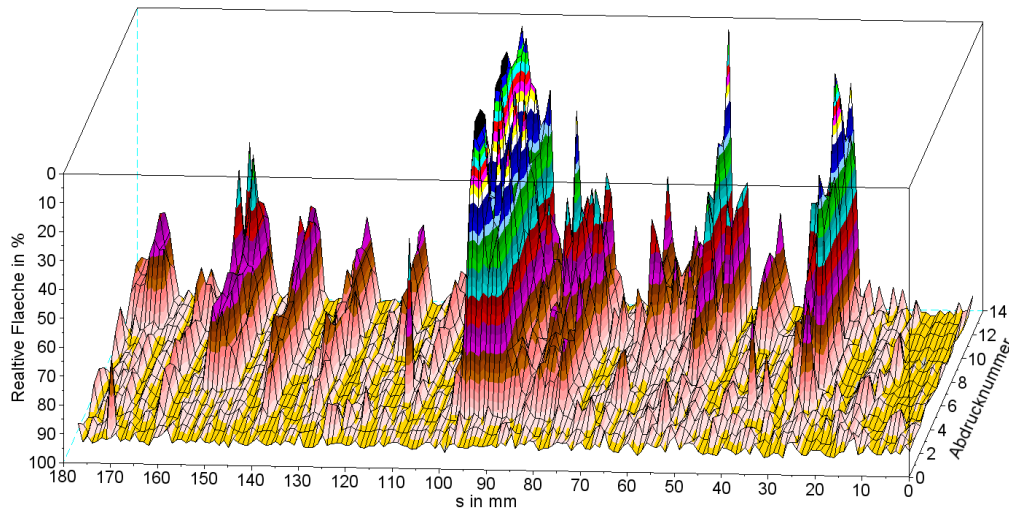


Abbildung 11: Invertierte dreidimensionale Darstellung der relativen Flächenänderung in Abhängigkeit der Position des Schneidenquerschnitts in mm und des jeweiligen Schneidenabdrucks.

Es ist zu erkennen, dass die Häufigkeit der Verschleißstellen an der Schneidkante zunimmt. Ein globales gleichmäßiges Verschleißbild lässt sich sowohl in **Abbildung 10**, wie auch in **Abbildung 11** nur schwer erkennen. Dieses Verhalten deckt sich mit den Erfahrungswerten aus der Praxis, welches als typisches Erscheinungsbild bei der Grasernte auftritt. **Abbildung 12** zeigt den jeweiligen Boxplot-Verlauf des relativen Flächenmerkmals über der abgeernteten Feldfläche in Hektar.

Wie aus dieser Grafik ersichtlich ist, nimmt der Median über die abgeerntete Fläche stetig ab. Zusätzlich ist einer Vergrößerung der Streuung der einzelnen Boxplots erkennbar, jedoch müssen hier auch natürlichen Schwankungen berücksichtigt werden. Die im hinteren Teil auftretende Minderung der Streuung kann mit dem herzustellenden Produkt (Futtersilage (FS) oder Biogassubstrat (BG)) in Verbindung stehen. Hierfür sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich. Da die dargestellten Ausreißer keine eigentlichen Messfehler widerspiegeln, werden diese bei der Berechnung des Medians mitberücksichtigt.

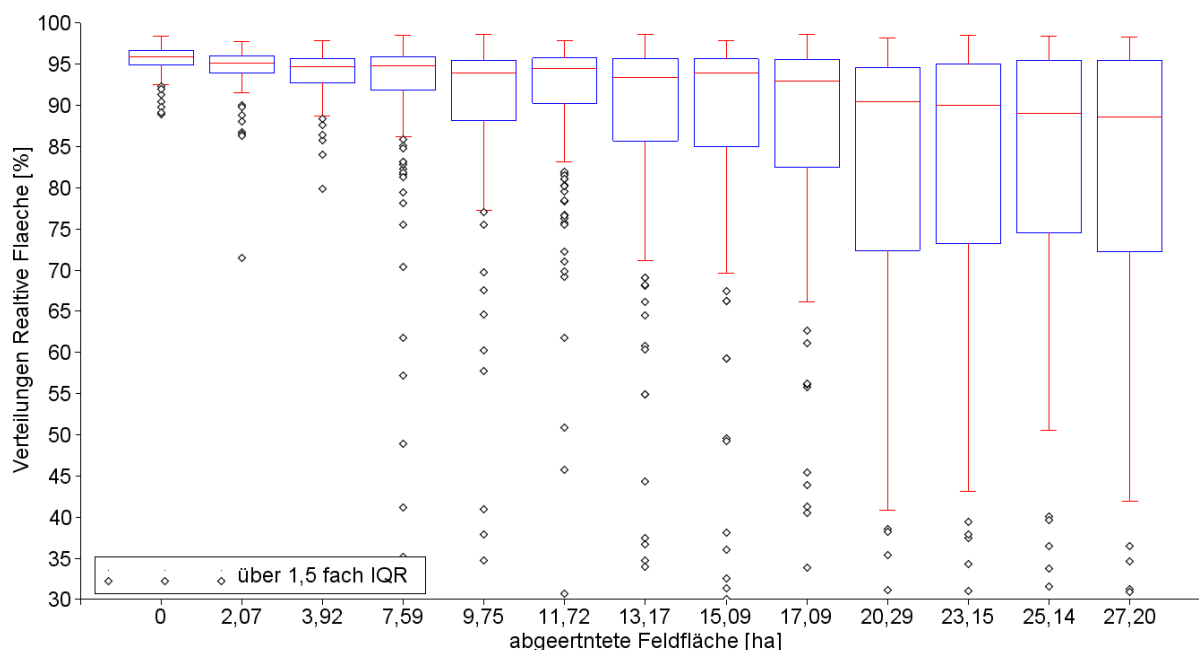


Abbildung 12: Darstellung der Boxplots der relativen Fläche in Abhängigkeit der abgeernteten Feldfläche in Hektar. Die Angabe der Feldgröße kann mit der jeweiligen Abdruck-Nr. aus **Tabelle 1** gleichgesetzt werden. Alle Werte welche über dem 1,5 fachen IQR¹-Wert liegen, werden als sogenannte „diamonds“ abgebildet.

4 Diskussion

Nach KOVAC *et al.* 2011 treten grundsätzlich verschiedene Verschleißformen an einem Häckselmesser auf, welche die in **Abbildung 2** veranschaulichten Änderungen an der Schneidengeometrie zur Folge haben. Die Berechnung des Schneidenrückgangs kann zusätzlich als nützliches Maß hinzugenommen werden. Die Berechnung kann auf zwei Arten geschehen. Das erste Verfahren verwendet den Abstand zwischen einer senkrecht zur Winkelhalbierenden und dem Schnittpunkt der idealen Messerflanken. Die orthogonale Linie auf der Winkelhalbierenden muss jedoch mindestens einen Schnittpunkt mit der Schneidenkontur besitzen. Die zweite Variante verwendet den Radius eines Kreises zwischen der Schnittpunkt der Messerflanken und dem ersten Schnittpunkt des Kreises mit dem Messerquerschnitt. Die erzielten Ergebnisse für die Berechnung des Schneidenrückgangs nach Variante 1 sind in **Abbildung 13** dargestellt. Hierbei kann jedoch eine höhere Unsicherheit des Medianverlaufs festgestellt werden. Daraus lässt sich der Rückschluss ziehen, dass der Schneidenrückgang für diese Messreihe kein optimales Kriterium für die Bestimmung des Schneidenverschleiß darstellt.

¹ IQR – engl. interquartile range

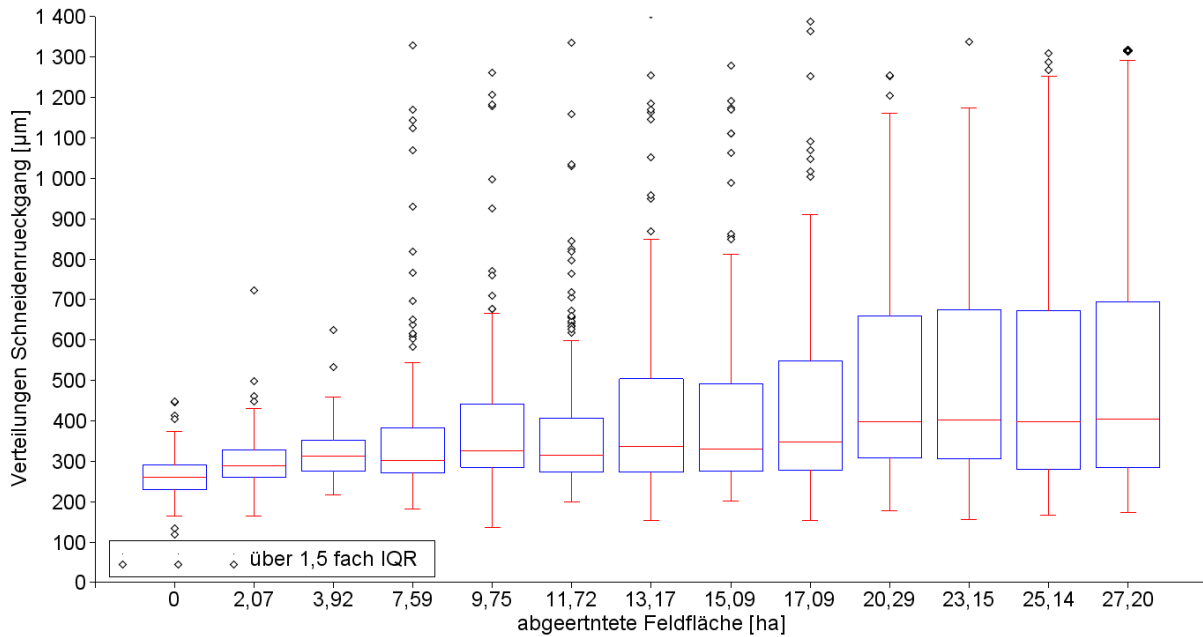


Abbildung 13: Darstellung des Ergebnisses des Schneidenrückgangs der vorliegenden Messreihe.

Ein weiteres Kriterium für den Schneidenverschleiß ist die Berechnung der Schneidenverrundung. Dies erfolgt mit der Bestimmung von Hilfsgeometrien wie Kreis, Ellipse oder Parabel. Diese Methodik ist jedoch ungenau, da diese Geometrien immer nur eine Näherung zum tatsächlichen Messerzustand darstellen und daher systematische Abweichungen enthalten. Beispielsweise können Ausbrüche oder Schadstellen mit dieser Methode nur schwer oder gar nicht beschrieben werden. **Abbildung 14** zeigt drei erzeugte Querschnittselemente des Abdrucks Nr. 13. Wie zu erkennen ist, sind mehrere Verschleißbilder auf einem Schneidenabdruck zu finden. Eine Verschleißberechnung mit Hilfsgeometrien über die gesamte Schneidengeometrie wäre nur mit erhöhtem Aufwand realisierbar.

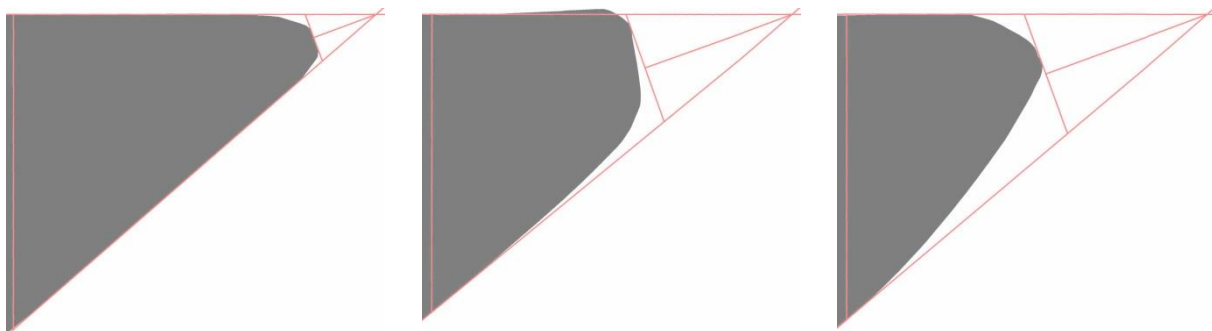


Abbildung 14: Darstellung von auftretenden Verschleißerscheinungen eines Abdruckes am Beispiel von Abdruck-Nr. 13 (**Tabelle 1**) der durchgeführten Erntefahrt.

Die Verschleißfläche als Maß für den Messerverschleiß ist in der Literatur nur analytisch beschrieben. Es basiert auf der idealisierten Annahme einer radialen, kreisförmigen Schneidenverrundung und berücksichtigt nicht den tatsächlich vorhandenen Messerverschleiß. (HEINRICH 2007)

Das hier vorgestellte Verfahren bietet sich als eine sehr gute Alternative für die Verschleißerfassung und Auswertung an. Die Berechnung der relativen Verschleißfläche zu einer idealisierten Dreieckfläche ermöglicht eine robuste und schnelle Auswertung des aktuellen Messerverschleißes ohne die Verwendung von Hilfsgeometrien. Die dreidimensionale Analyse von Schneidengeometrien war schon Teil der Arbeit von JAHR *et al.* (2015). Die Erweiterung dieser Methode unter Verwendung der vorgestellten Abdrucknahme führte mit der Berechnung der Querschnittsflächen zu einer genaueren Analyse des auftretenden Verschleißbildes. Mit dieser Methode ist es möglich, den Verschleiß der Schneide im Zeitverlauf einer Erntefahrt analytisch zu beschreiben, um eine dimensionslose Kennzahl für den Messerverschleiß zu ermitteln. Wenn dies in Zusammenhang mit der jeweiligen Anwendung, der Schnittqualität, dem Schnittgut oder den Schnittgeschwindigkeiten gesetzt wird, kann eine Aussage über die Messerschärfe abgeleitet werden.



Die Förderung erfolgte aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank.

Literaturverzeichnis

- GOM (2016):** Dynamische Referenzierung und integrierte Überwachung, GOM GmbH, <http://www.atos-core.com/de/features.php>
- GÜHRING J. (2002):** 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, Dissertation Universität Stuttgart, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN: 3 7696 9599 2.
- HARTWIG S. (2016):** Projektarbeit: Entwicklung eines Verfahrens zum Kopieren von Schneiden in einem Feldhäcksler, Masterprojekt, HS Schmalkalden.
- HEINRICH A. (2007):** Grundlagen für ein Messsystem zur Bestimmung des Verschleißzustandes des Häckselaggregates eines Feldhäckslers. TUDPress.
- JAHR A., BATOS A., SIM H., VILLENA MARTÍNEZ J.D., ZEPKE S. (2012):** Eine neuartige Methode zur Bestimmung der Verschleißfestigkeit von Häckslermessern – A novel method for determining the wear resistance of cutter blades. In: 70. Internationale Tagung Landtechnik, Karlsruhe, 06.-07. November 2012, VDI-Berichte Nr. 2173, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2012, S. 263-270.
- JAHR A., BONGARTZ R., SIM H., PILLMANN A. (2015):** A Novel Test Method to Determine the Wear Resistance of Agricultural Cutting Tools with an Analyzing Method Based on an Ellipse-Fit Algorithm. Conference Papers in Science 2015:1–6. DOI:10.1155/2015/548238.
- KOVAC J., KRILEK J., KALINCOVA D. (2011):** The method analysis of saw blade wearing measurement. Journal: Manufacturing and industrial engineering, ISSN: 1335-7972, 2011 / issue 1.
- ROUSEK M., KOPECKY Z., NOVAK V. (2009):** Results of research into high-speed milling. [CDROM]. In *Forest, Wildlife and Wood Sciences for Society Development*. 451–460. ISBN 978-80-213-2019-2. In Czech.

Pod-Copter ein kabelgebundenes und autonom fliegendes UAV zum Einsatz als zeitlich unbegrenzte Trägerplattform in der Landwirtschaft

Christian Gieselmann

*Insensiv GmbH, Auf dem Esch 28, 33619 Bielefeld
E-Mail: c.gieselmann@insensiv.de*



Zusammenfassung: Unmanned aerial vehicles (UAVs) bieten durch sich immer weiter und rasant entwickelnde Technik vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Bereich landwirtschaftlicher Anwendungen. Jedoch bringt deren Einsatz auch einige Herausforderungen mit sich, welche für den Anwender zu lösen sind.

Der Pod-Copter als kabelgebundenes UAV wird über die Verbindungsleitung mit Strom versorgt, dies ermöglicht einen Dauereinsatz über den ganzen Arbeitstag. Eine optische Lagesteuerung ermöglicht eine autonome Steuerung des Copters, nur der Start- und Landevorgang wird durch den Bediener eingeleitet. Im Betrieb hält der Copter seine relative Position zum Fahrzeug, die je nach Aufgabenstellung vor oder hinter und in variabler Höhe liegen kann.

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 kann der Pod-Copter unter anderem zur Erfassung bei Kraut und Wildtieren genutzt werden oder um eine Analyse des Nährstoffgehalts des Bodens durchzuführen. Darüber hinaus können beispielsweise Bestandskanten von Ackerflächen erkannt oder Bewuchs Zustandserkennung vor dem Fahrzeug in Echtzeit (Online) ausgewertet und direkt mit gezielter Steuerung z.B. des Sprüngerätes reagiert werden.

In Bezug auf rechtliche Gegebenheiten in der Luftfahrt und Handhabung ergeben sich ebenfalls Vorteile durch die Kabelbindung des Fluggerätes. 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 erfüllt. Zudem erleichtert die automatische Positionierung und Steuerung durch die eingebaute Sensorik die Handhabung, da ein Betrieb ohne spezielles Personal, aeronautische Kenntnisse oder die Notwendigkeit von umfangreichen Schulungen möglich ist.

Einmal angeschlossen begleitet der Copter das Fahrzeug den ganzen Arbeitstag, es ist kein weiteres Eingreifen seitens des Fahrers nötig, um den Pod-Copter in der Luft zu halten.

Einleitung

Der Wissensstand, den man zurzeit zum Copter hat lautet wie folgt: sie sind GPS gesteuert, manuell, Sensoren sind auf Copter vorhanden, es findet eine Offline Auswertung statt. Unser Ziel ist eine permanente Haltung einer vorgegebenen Position. Die Sensorplattform, die mit verschiedenen Sensoren besetzt ist, soll das Areal dauerhaft autonom und in Echtzeit analysieren.

Material und Methoden

Probenmaterial, Versuchsdurchführung und Methoden

Da alle vorhandenen Copter auf dem Markt nicht für den gedachten Anwendungsfall konzipiert sind, haben wir uns entschlossen, alle notwendigen Teile neu zu konzipieren, bzw. eine komplette Neukonstruktion durchzuführen. Hierzu stand als erstes die Überlegung an, welche Bauform verwendet wird. Bei einem Quadcopter hätten wir leistungsstärkere Motoren auswählen können, die stärkere Lager hätten und somit eine längere Lebenszeit ermöglichen.

Bei einem Hexacopter könnten wir jedoch einen kleineren Motor verwenden. Diese besitzen in der Regel aber ein schwächeres Lager und unterliegen somit einem verstärk-

ten Verschleiß. Wir haben uns für die Konstruktion eines Hexacopters entschieden, da wir hier beim Ausfall eines Motors den Copter noch sicher betreiben können, ohne einen direkten Absturz zu erleiden.

Die Entwicklung des Grundkörpers musste mehrere Eigenschaften abdecken:

- Die Form musste einen maximalen Schutz der Rotoren sicherstellen
- Das max. Gewicht für alle CFK Bauteile liegt bei 1Kg
- Die Festigkeit muss den harten Alltagsbedingungen in der Landwirtschaft standhalten
- Die Elektronik in einem geschlossenen Körper geschützt vor Umweltbedingungen
- Der Preis soll für eine Serientaugliche Vermarktung akzeptabel sein

Alle diese Eigenschaften konnten mit Kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen (CFK) in Kleinserie realisiert werden. Bei Testflügen wurde die Zelle aus drei Metern Höhe freier Fall auf das Fahrwerk belastet, dabei wurde durch die Formgebung und dem Material die Energie soweit aufgenommen das keine Beschädigungen am Grundkörper auftraten. Das Gewicht aller CFK-Bauteile: Grundkörper, Bodeneinsatz, Fahrwerk und Abdeckung liegt aktuell bei 970g.



Abbildung 1: Aufbau des Hexacopters

Für unseren Einsatz ist ein Motor mit verstärkten Lagern und einer Regenschutzkappe in der Entwicklung. Wir benötigen eine Laufzeit von min. 2.000 Stunden, selbst dann ist der Motor Verschleißteil und muss ca. alle 4 Jahre getauscht werden. Aktuell haben wir modifizierte Außenläufermotoren mit größeren Lagern bei 1200 Std. ohne Defekt im Dauertest getestet. Die Energieübertragung ist eine besondere Herausforderung, da bei längerer Kabellänge das Gewicht größer wird und umso mehr Gewicht der Copter tragen muss, umso mehr Leistung wird benötigt.

Die Energieübertragung mittels DC/DC Wandler ist deshalb fester Bestandteil des Entwicklungsprojektes. Wir setzen einen Spannungswandler ein, der eine Spannung von bis zu 400 VDC am Copter auf die benötigte Boardspannung von 15 VDC für die Motoren herunter transformiert. Die auf dem Markt erhältlichen Module sind soweit für unse-

re ersten Flugversuche tauglich, aber in der Serie werden wir eine Eigenentwicklung aus Optimierungsgründen einbauen. Die Landeplattform muss deshalb auch die geforderte Spannung von 400 VDC zur Verfügung stellen, damit das System betrieben werden kann.

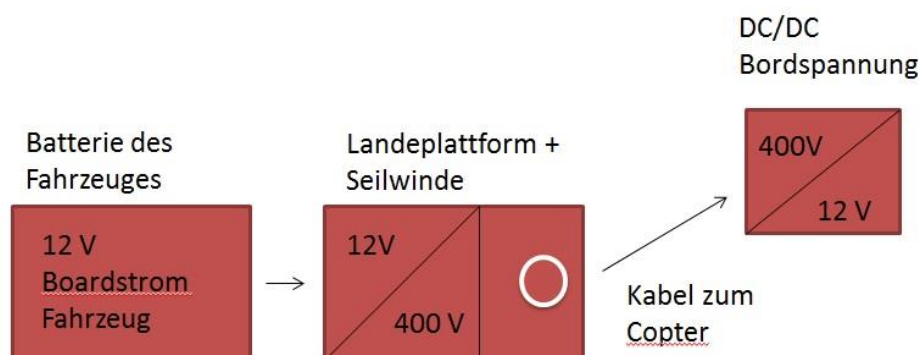


Abbildung 2: Schemata Zeichnung der Spannungstransformation vom Fahrzeug zum Copter

Das Kabel kann somit mit einem deutlich kleineren Querschnitt und somit mit einem deutlich kaum noch merklichen Gewicht eingesetzt werden. Als weiteren Optimierungsschritt entwickeln wir ein Aluminiumkabel, das einen besseren Leitwert im Verhältnis zum Kupferkabel bei gleichem Gewicht hat. Hierdurch wollen wir längere Reichweiten (Kabellängen) erzielen.

Positionierung / Steuerung

Damit der Copter in der vorgegebenen Position zum fahrenden Fahrzeug verbleibt, muss dieser permanent hochpräzise die Position halten. Per GPS ist dies theoretisch möglich, aber bei einer Abweichung von einigen dm befürchten wir eine aufklingende Schwingung in der Nachregelung, so dass wir keine gerade Spurführung erreichen. Besonders in der Höhenmessung haben wir unsere Bedenken.

Wir haben uns für ein kamerabasiertes Messverfahren entschieden, bei dem eine Kamera die Landeplattform am Fahrzeug permanent im Blickfeld hat, dessen Markierungen und mittels eines Modells die Raumkoordinaten des Copters zu der Landeplattform in Echtzeit ermittelt. Die ermittelte Lageerkennung durch die Kamera wirkt auf die Steuerung des Copters direkt ein. Der ursprüngliche Ansatz, die Landeplattform mit passiven Symbolen und Kreisen auszurüsten, wurde dahin erweitert, dass aktive LEDs eingesetzt werden.

Landeplattform

Die Lageerkennung basiert jetzt auf einem ebenen LED-Muster auf der Landeplattform, das von einer an dem Copter befestigten Kamera analysiert wird. Das Muster ist redundant ausgelegt und liefert auch bei zwei verdeckten/defekten LEDs die dreidimensionale Position und Ausrichtung des Copters. Das System aktualisiert die Lage 70 Mal in der Sekunde und damit wesentlich häufiger als GPS. Die Genauigkeit liegt im Bereich von <25 cm (15 m Abstand) und <10 cm (2 m Abstand). Damit ist das System gerade im kritischen Bereich während des Start- und Landevorgangs wesentlich genauer als GPS.

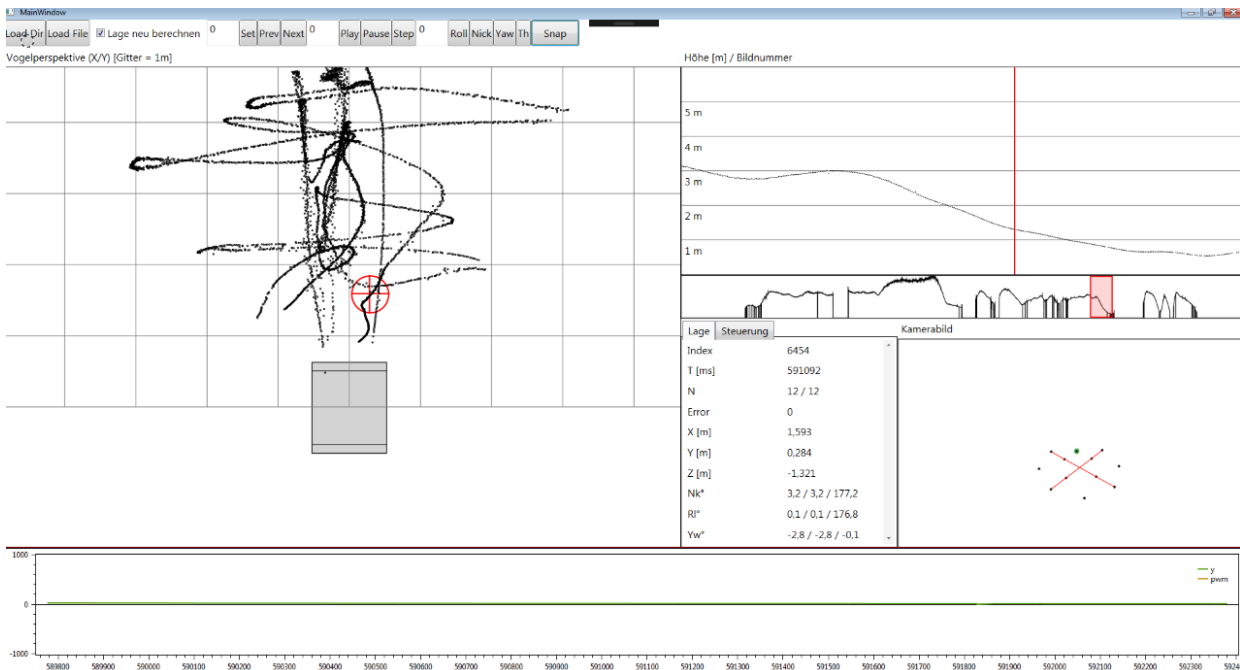


Abbildung 2: Für die spätere Analyse können Flüge aufgezeichnet werden. Das Bild zeigt die dafür entwickelte Software

Aufbau Landeplattform

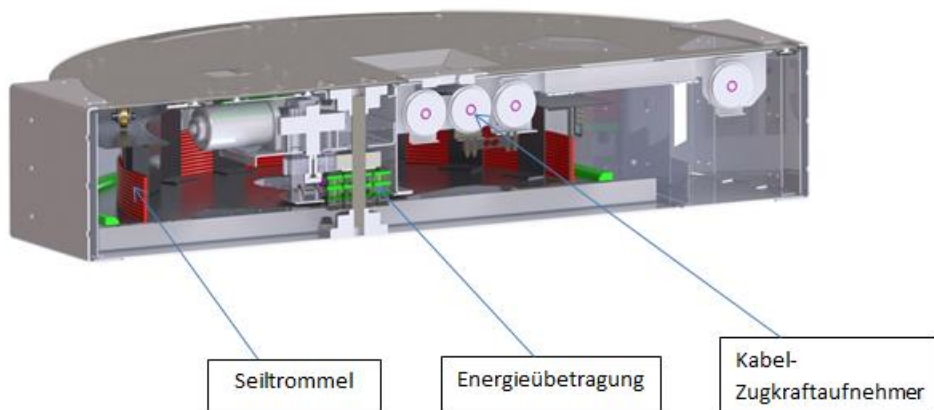


Abbildung 3: Landeplattform Schnittdarstellung

Verwendung RTK-GPS

Im Nahbereich zum Fahrzeug bis ca. 15 m Entfernung verwenden wir unser Optisches Positionierungssystem. Größere Distanzen und um Redundanz zu erzielen wird ein RTK-GPS eingesetzt. Das verwendete RTK-GPS von Reach L1 RTK GNSS pro Modul mit Antenne ca. 100 g. So ist für den Übergang von urbaner Umgebung zu größeren Höhen ein Wechsel von optischer Positionierung zur RTK-GPS realisiert. Hierbei ist eine ungestörte Verbindung mit einer ausreichenden Zahl von Satelliten gewährleistet.

Grundlegendes Verfahren ist hier die Verwendung von zwei GPS Empfängern, welche als bewegbare Basis und bewegter Empfänger miteinander kommunizieren. Gegenüber dem regulären GPS wird hier eine Genauigkeitssteigerung, mit einer Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten, über ein polares Anhängen oder Ergänzen beider Koordinaten bewerkstelligt. Im optimalen Fall werden Genauigkeiten von mehreren Dezimetern erreicht.

Zu Testzwecken wurden definierte Strecken abgelaufen und zeitgleich aufgezeichnet (**Abbildung 5**). Über den Überlapp von Hin- und Rückweg lassen sich Genauigkeit und Einschränkung grob erfassen. So zeigt sich unter freiem Feld (Gerade 2) eine gute Genauigkeit, wohingegen unter eingeschränkter Sicht (Gerade 1) eine wesentlich ungenaueres Ergebnis erzielt wird.

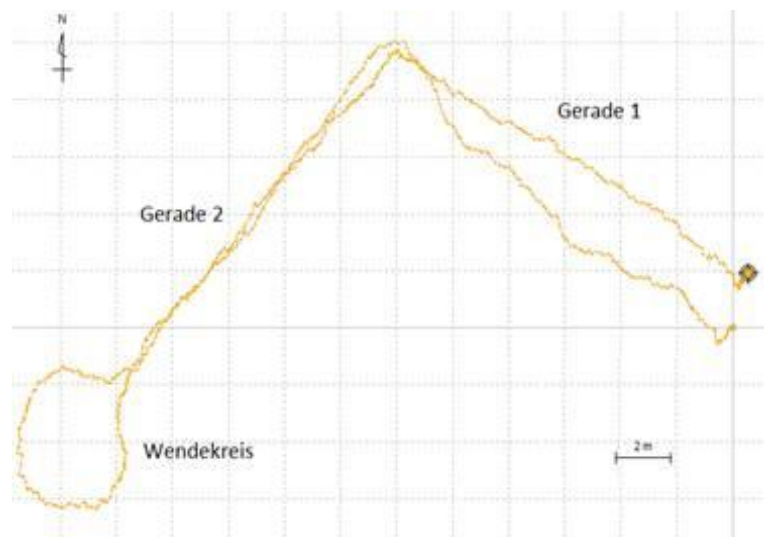


Abbildung 5: GPS-Aufzeichnung definierter Strecken

Eine integrierte Elektrowinch mit Kraftsensor am Kabel ermöglicht dies in Kombination mit der kamerabasierten Lageerkennung. Bei der Elektrowinch ist dabei drauf zu achten, dass die Kabel sauber geführt werden und diese beim Auf- und Abwickeln nicht verknoten können. Die Landeplattform, in der sich die Elektrowinch und Energieübertragung befindet, muss transportabel sein, um sie zumindest mit 2 Personen am Fahrzeug befestigen zu können. Die ursprüngliche Idee, diese auf dem Dach zu montieren,

können wir verwerfen, da die Straßenverkehrsordnung keine Aufbauten über 4 m Höhe zulässt.

Eine schnelle Montage am Vorderlenker oder an einem vorgesehenen Platz, wo Halterungen angebracht sind, ist deshalb notwendig. Das triviale Thema Montagefreundlichkeit kann marktentscheidend sein, da die Landevorrichtung für verschiedene Fahrzeuge wie Traktoren, Mähdrescher, selbstfahrende Erntehäcksler u.a. wechselbar sein soll, um eine große Möglichkeit an Einsatzzwecken zu gewährleisten.

Der Copter ist mit dem Kabel über eine Kupplung verbunden. Diese Kupplung kann im Bedarfsfall per Steuerung im Flug getrennt werden, also im Fall einer andauernden Stromunterbrechung von seitens der Landeplattform. In diesem Fall kann der Copter sicher selbstständig notlanden. Damit das selbstständige Notlandeszenario funktioniert, ist ein kleiner Reserve-Akku an dem Copter untergebracht.

Weiterhin hat die Kupplung einen mechanischen Schutz, wenn die Zugkräfte an der Kupplung über den eingestellten Wert gehen, dann öffnet die Steckverbindung von alleine. Dies erfolgt im Fall, dass der Copter irgendwo hängen bleibt, also zum Bsp. an Ästen, damit es keine größeren Beschädigungen am Copter gibt. Die Sensoren sollen diesen Fall vermeiden. Hier sind wir in der Testphase, welche Sensoren wie weit im Vorfeld kleine Details erkennen. Ultraschallsensoren funktionieren nur bis zu einer gewissen Geschwindigkeit. Radarsensoren müssen gerichtet werden und sollen trotzdem noch Details wie Überlandleitungen erkennen. Diese Entwicklungsschritte sind bisher nur dafür da, um den Copter in der Position zum fahrenden Fahrzeug zu halten.

Damit er seine eigentliche Aufgabenstellung als Sensorplattform durchführen kann, benötigt der Copter einen Gimbal. Diese Vorrichtung ermöglicht die lagegetreue Ausrichtung der Sensorik in der vorgegebenen Position, zum Bsp. direkt nach unten im 90 Grad Winkel zur Arbeitsebene. Hierzu muss der Gimbal in 3 Achsen permanent nachgeregelt werden, um die Lage des Copters auszugleichen. Eine universelle Trägerplatte soll es ermöglichen, verschiedene Sensoren an dem Gimbal zu befestigen. Dies soll eine schnelle Montage ermöglichen und die Spannungsversorgung für den Sensor ebenfalls mit integriert haben.

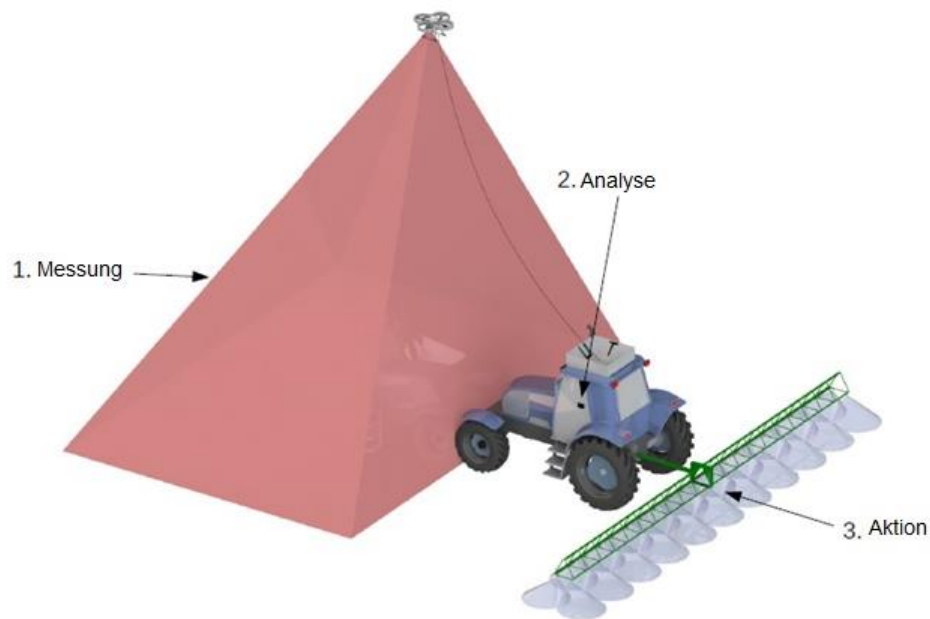


Abbildung 6: Beispiel Anwendung

Als Sensoren kommen unter anderem zum Einsatz:

- RGB Kameras
- IR Kamera
- Spektralkameras
- Thermografiekameras
- Stereokameras

Entwicklung der Elektronik für die Seilwinde (Bachelorarbeit)

Die Entwicklung der Seilwindensteuerung wurde in einer Bachelorarbeit ausgeführt. Folgende Überlegungen waren zentraler Bestandteil der Aufgabenstellung:

- Die Seilwinde soll Autonom einen konstanten Kabeldurchhang sicherstellen und dabei die kleinstmögliche Zugkraft auf den Copter ermöglichen.
- Entwicklung der Motorsteuerung
- Auslegung der Regelkreise für die Winde

Versuchsaufbau

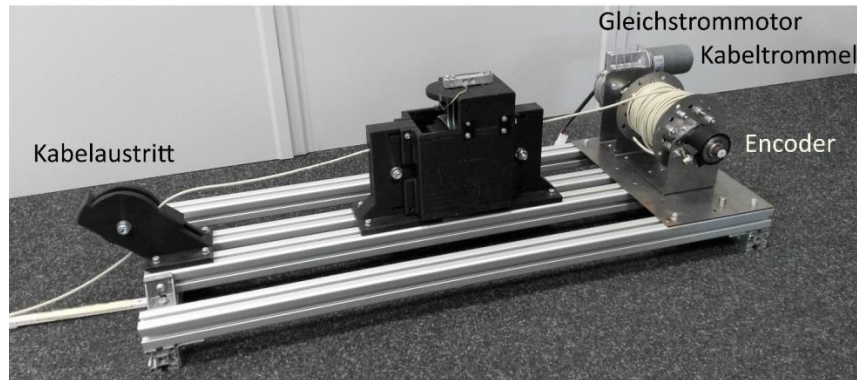


Abbildung 7: Gliederung Testaufbau

Die Wichtigsten Komponenten des Testaufbaus sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zu erkennen. Vorne befindet sich der Kabelaustritt. Im hinteren Teil sind der Gleichstrommotor (Aktor), die Kabeltrommel und der Encoder (Sensorik) zusammen verbaut. Die Leistungselektronik zur Steuerung und Regelung des Testaufbaus (Regelstrecke) wird in dieser Arbeit entworfen und hergestellt.

Modellbildung Kettenlinie

Nachdem der Vierquadrantenchopper erstellt wurde, werden in den folgenden Kapiteln die Grundlagen zur Kettenlinienfunktion beschrieben. Eine Kettenlinie, auch Katenoide genannt, beschreibt das Verhalten einer Kette oder eines Kabels, wenn Sie zwischen zwei Punkten angebracht wird.

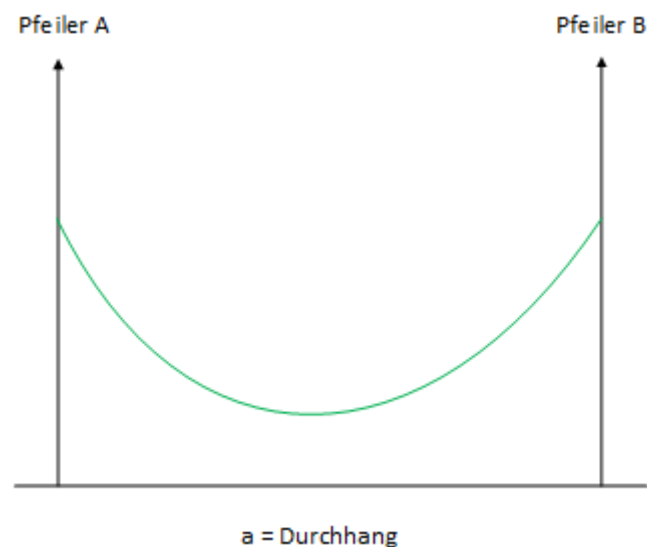


Abbildung 8: Kettenlinie

Da die Kabeltrommel ein Kabel abwickeln soll, welches sich mathematisch und physikalisch wie, in **Abbildung 8** zu sehen, eine Kettenlinie verhält, muss die Funktion bekannt sein. Denn anhand der Funktion kann die abgewickelte Länge bestimmt werden. Dazu

wird im folgenden Abschnitt die Herleitung der Differentialgleichung für die Kettenlinie beschrieben. Zur Herleitung der Kettenlinie werden erste Annahmen getroffen: „Seile und Ketten können ausschließlich Zugkräfte übertragen, die in jedem Punkt die Richtung der Tangente der Seil- bzw. Kettenlinie haben. Da Seile und Ketten weder Querkräfte noch Biegemomente übertragen können, bezeichnet man sie als biegeschlaff. Die durch die Zugkräfte hervorgerufenen Verformungen sind klein und können für die statischen Untersuchungen vernachlässigt werden. Die Seile und Ketten werden als dehnstarr behandelt. Zur Aufstellung der Differentialgleichung wird ein Kräfteparallelogramm an einem Stück der Kettenlinie aufgestellt.

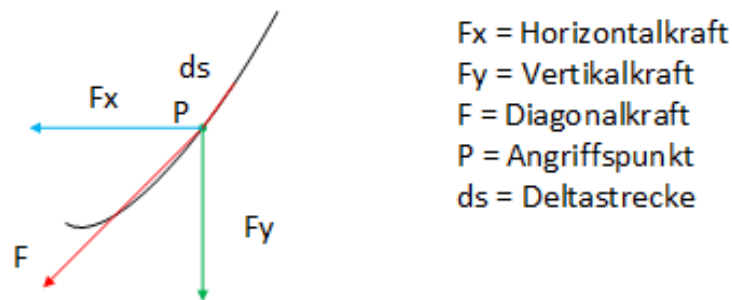


Abbildung 9: Herleitung Kettenlinie

Wie in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zu erkennen ist, wird die Diagonalkraft F in einem beliebigen Punkt abgegriffen. Diese Kraft spiegelt die Zugkraft am Kabel wider. Die Diagonalkraft F kann, durch die Gleichgewichtsbetrachtung, in Horizontalkraft und Vertikalkraft aufgeteilt werden. Die Horizontalkraft $F_x(x)$ wird bei einem Kabel unter Eigengewicht als konstant angenommen

$$F_x(x) = konst. \quad (1)$$

Daraus entsteht folgende Aussage: „Der Horizontalzug (horizontale Komponente der Seilkraft) ist in einem nur durch Eigengewicht belasteten Seil konstant.“ Die spezifische Längeneinheit q bildet sich aus dem Gewicht m und der Erdbeschleunigung g pro Längeneinheit l

$$q = \frac{m * g}{l}. \quad (2)$$

Die Vertikalkraft $F_y(x)$ der Kettenlinie entsteht durch

$$F_y(x) = q * ds. \quad (3)$$

Dabei ist q die spezifische Längeneinheit und ds ein Längenpunkt in der Kettenlinie. Wird die Kette in so kleine Abschnitte wie möglich geschnitten, entsteht eine Gerade und es kann der Satz des Pythagoras angewendet werden

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (4)$$

Mit dem Ableiten nach x folgt

$$ds = \sqrt{1 + y'(x)^2} dx. \quad (5)$$

Die Diagonalkraft entsteht durch die Beziehung von Vertikal- und Horizontalkraft

$$\tan \varphi = \frac{F_y(x)}{F_x(x)} = y'. \quad (6)$$

Wird nun nochmal nach x abgeleitet und dies in die Gleichgewichtsbedingung eingesetzt, entsteht

$$F_x * y''(x) = q * \sqrt{1 + y'(x)^2}. \quad (7)$$

Mit

$$a = \frac{q}{F_x} \quad (8)$$

entsteht

$$y''(x) = a * \sqrt{1 + y'(x)^2}. \quad (9)$$

Mittels Substitution und Trennung der Variablen wird die Differentialgleichung gelöst. Somit kann die Kettenlinie beschrieben werden mit

$$y(x) = \frac{1}{a} * \cosh(a * x). \quad (10)$$

Der Cosinus Hyperbolicus kann mit der e-Funktion umgeschrieben werden

$$y(x) = \frac{1}{2a} * (e^{ax} + e^{-ax}). \quad (11)$$

Berechnung

Für die Berechnung der Kettenlinie soll eine Horizontalkraft so gering wie möglich an dem Kabel wirken. Da bei einer horizontalen Kraft von Null das Kabel auf dem Boden liegen müsste, ist dies zu vermeiden, da die Arbeitsmaschine dadurch gestört wird. Daher wird untersucht, bei welcher horizontalen Kraft der Durchhang des Kabels eine homogene Verbindung zur autonomen Drohne herstellt. Damit die Regelung der Kabeltrommel auf plötzliche Bewegungen der Drohne reagieren kann, ist es wichtig die Kraft auf der horizontalen Achse möglichst gering zu halten und genügend Reserven im Ka-

bel bereitzustellen. Der Durchhang berechnet sich anhand der Horizontalkraft und der spezifischen Längeneinheit. Bei der Berechnung des Durchhangs a

$$a = \frac{q}{F_x} = \frac{m * g}{F_x} = \frac{0,035 \frac{kg}{m} * l * g}{F_x} = \frac{0,035 \frac{kg}{m} * g}{F_x} \quad (12)$$

werden auf die Masse pro Längeneinheit des Kabels $0,035 \frac{kg}{m}$ verschiedene Kräfte am Kabel untersucht.

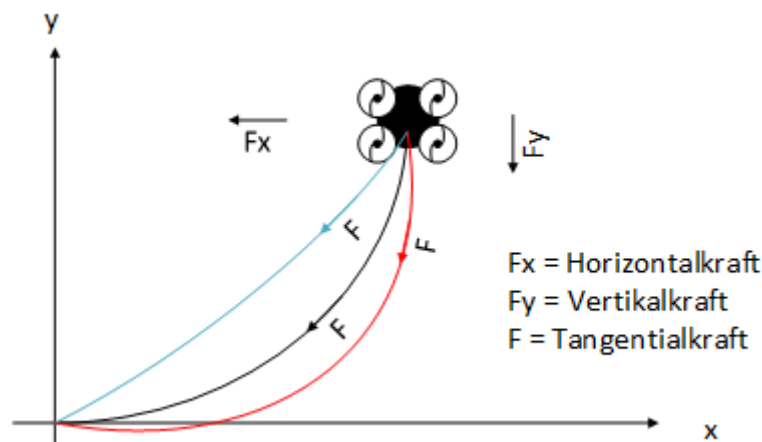


Abbildung 10: Kräfte am Kabel

In **Abbildung 10** sind verschiedene Kräfte an der horizontalen Achse dargestellt. Wird das Kabel (blau dargestellt) abgewickelt, wirkt eine größere Kraft in die horizontale Achse, was zu vermeiden gilt. Bei dem Kabel (rot) ist die horizontale Kraft so gering wie möglich, dass fast nur die vertikale Komponente wirkt. Dadurch entstehen ein größerer Durchhang und eine geringere Kraft in der horizontalen Achse. Für einen homogenen Durchhang (schwarz) ist die Kraft in der horizontalen sowie der vertikalen Achse gleich groß. Für die Berechnung wird ein homogener Durchhang mit $a = 1$ gewählt und in die Formel (11) eingesetzt.

$$y(x) = \frac{1}{2 * 1} * (e^{x*1} + e^{-x*1}).$$

Zur Berechnung der Kabellänge wird die Fläche unter der Kurve betrachtet.

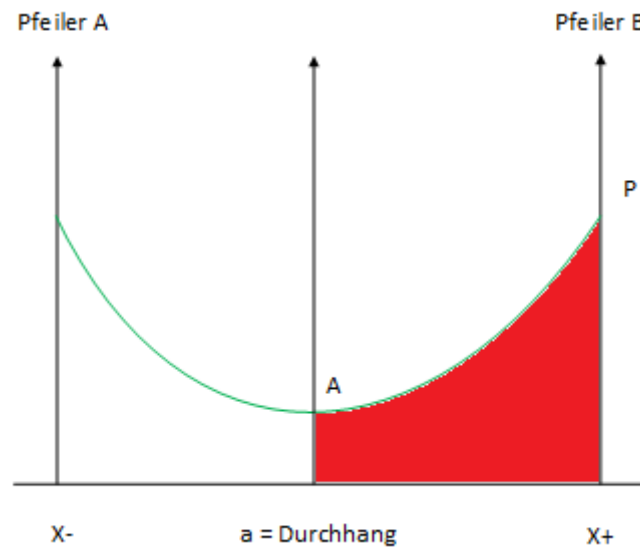


Abbildung 11: Integral Kettenlinie

Ein Integral wird, wie in **Abbildung 11** dargestellt, zwischen A und P gebildet.

$$y(x) = \int_0^{x_+} \frac{1}{2} (e^x + e^{-x}) dx$$

Der Faktor wird vor das Integral gezogen

$$y(x) = \frac{1}{2} \int_0^{x_+} (e^x + e^{-x}) dx.$$

Beim Integrieren der e-Funktion entsteht wieder die e-Funktion. Bei der e-Funktion mit der e-Funktion mit der negativen Variablen wird nach der Integration ein negatives Vorzeichen davor gesetzt.

$$y(x_+) = \frac{1}{2} [e^{x_+} - e^{-x_+}] \quad (13)$$

Dies kann umgeschrieben werden in

$$y(x_+) = \sinh(x_+). \quad (14)$$

Die Formeln (13) und (14) werden mit dem Simulationsprogramm MATLAB / Simulink der Firma The MathWorks Inc über einen horizontalen Wertebereich von bis zu 3,5 m gebildet.

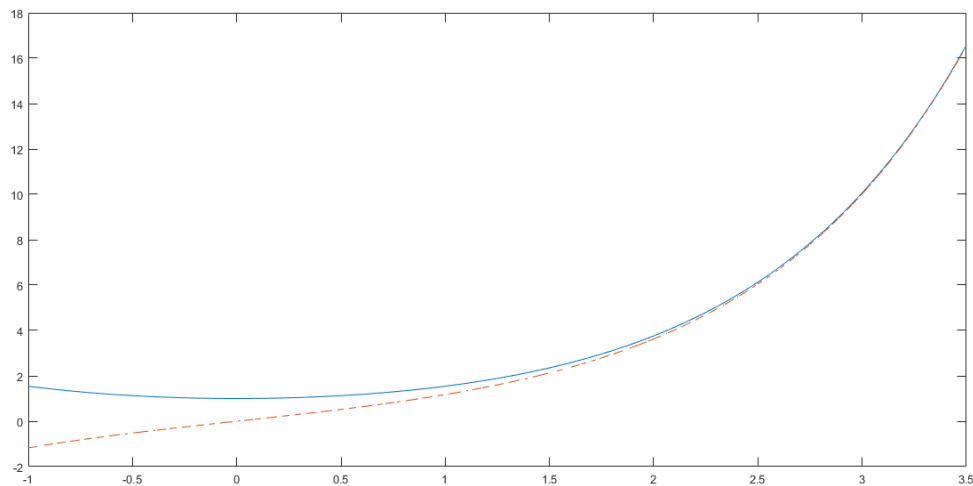


Abbildung 12: Vergleich sinh und cosh (1)

Bei dem Vergleich beider Kurven in **Abbildung 12** ist zu erkennen, dass sich beide Kurven ab einem horizontalen Wert von ca. 2,5m sich überschneiden. Außerdem ist zu sehen dass sich bei der Bildung des Integrals von Cosinus Hyperbolicus, in Blau dargestellt, mit einem homogenen Durchgang nicht die Länge über den Sinus Hyperbolicus, in Rot dargestellt, bilden lässt. Dies wird damit begründet, dass der Cosinus Hyperbolicus keinen Nulldurchgang besitzt.

Reglerentwurf - Zeitdiskrete Regelung

Regelalgorithmen werden heutzutage auf Mikrocontrollern programmiert. Der Unterschied von einer analogen Regelung zur digitalen Regelung ist, dass Analogeregler mit einem kontinuierlichen Signal arbeiten. Digitale Regler arbeiten wegen der Messung mit dem Analog-Digital-Wandler oder durch Verwenden von externen Interrupts Zeit- und Wertediskret. Der Unterschied zwischen den beiden Begriffen kontinuierlich und diskret wird im Folgenden dargestellt:

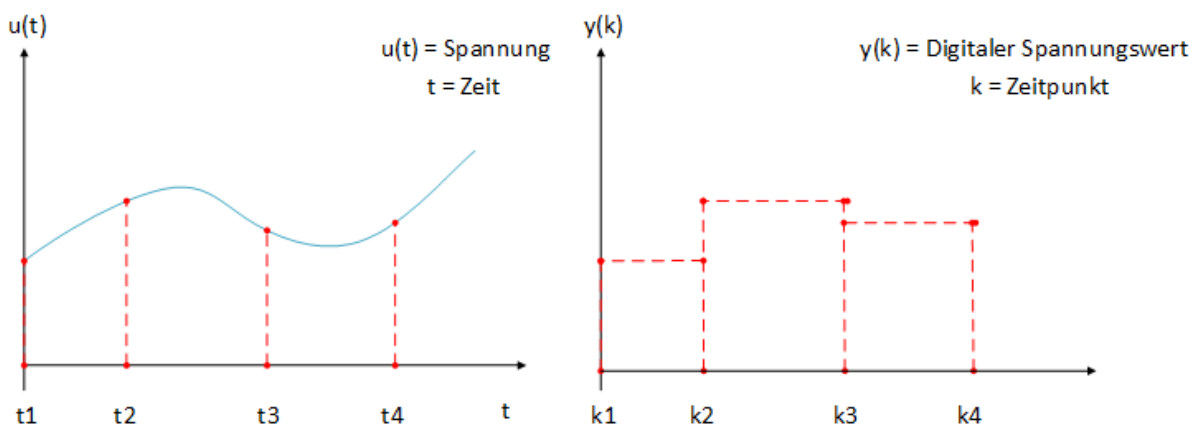


Abbildung 13: Kontinuierliches- und Zeitdiskretes Signal

In **Abbildung 13** ist eine Gleichspannung mit überlagerter Wechselspannung zu erkennen. Während ein analoger Regler die Spannung, in Blau dargestellt, zu jedem Zeitpunkt übertragen bekommt, enthält der digitale Regler nur Zeitpunkte, hier in Rot dargestellt. Das liegt vor allem zum Beispiel am Analog-Digital-Wandler. Der Analog-Digital-Wandler, kurz ADC (Analog-Digital-Converter), eines zum Beispiel Mikrocontrollers tastet das Signal in einer voreingestellten Frequenz systematisch ab und wandelt diese zeitdiskreten Werte in digitale Werte um.

Die Auflösung des Analog-Digital-Wandlers bestimmt die Wertigkeit des abgetasteten Signals. Die zu regelnde Strecke bestimmt die Wahl des Analog-Digital-Wandlers. Würde der Wandler zu langsam abtasten und das Signal nicht richtig erfassen, dann entsteht ein Aliasing-Effekt. Die Faustformel besagt, dass die Abtastfrequenz zwei Mal größer als die Frequenz des abgetasteten Signals sein sollte, um den Aliasing-Effekt nicht auftreten zu lassen.

Abtast- und Halteglied

Ein Abtast- und Halteglied beschreibt die Funktionsweise eines Mikrocontrollers. Ein Mikrocontroller tastet mit Hilfe des ADC ein Signal ab und speichert diesen zeitdiskreten und wertdiskreten Wert in eine Variable. Diese Variable verändert ihren Wert erst beim erneuten Ausführen einer Analog-Digital-Wandlung (**Abbildung 14**).

Durch diese Eigenschaft ist es möglich eine Differentialgleichung, durch eine Differenzengleichung auf einem Mikrocontroller zu realisieren. Dies ist erforderlich, da Differentialgleichungen Integrationen und Ableitungen enthalten. Eine Integration dient zur Berechnung der Fläche unter einem Signal. Diese Berechnung würde die Rechenleistung des Mikrocontrollers übersteigen. Daher wird auf eine Differenzengleichung zurückgegriffen.

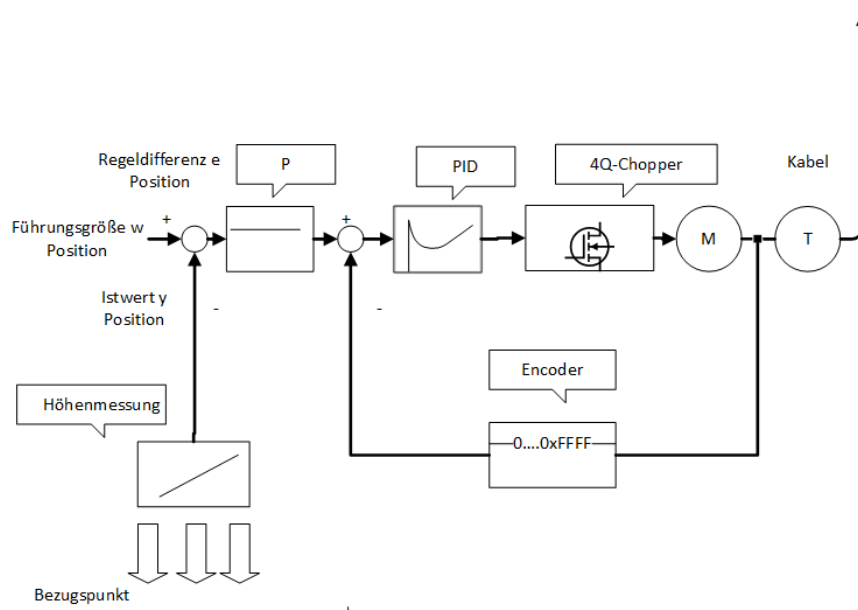


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Mikrocontrollers

Aufbau Steuerplatine

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist der Vierquadrantenchopper fertig verlötet und bestückt zu sehen. Im Vordergrund befinden sich die RS232 Schnittstellen und Anschlüsse für die Motor Versorgungsspannung. Weiter im Hintergrund sind die MOSFETs, Halbbrücken und der Mikrocontroller zur Steuerung des Gleichstrommotors zu erkennen.

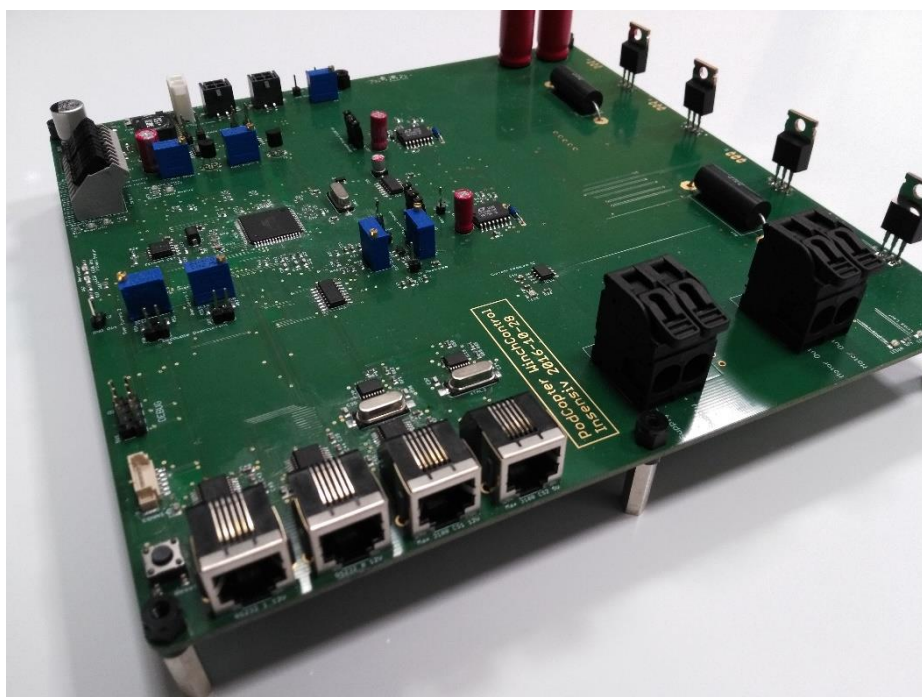


Abbildung 15: Vierquadrantenchopper

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Bachelorarbeit sollte ein Entwurf einer Aktorelektronik sowie zur Positionsregelung einer elektronischen Kabelwinde entwickelt werden. Die elektronische Kabelwinde soll für eine autonome Flugdrohne, welche ihre Spannungsversorgung durch ein Kabel bezieht, über die Vorgabe der Flughöhe, das Kabel auf- und abwickeln. Da sich die Drohne in der Luft befindet, bildet das Kabel eine Kettenlinienform. Der Durchhang der Kettenlinie bestimmt die Länge des abzuwickelnden Kabels.

Durch den Testaufbau und des aufgebauten Vierquadrantenchoppers konnte ein PID-Regler zur Drehzahlregelung implementiert und getestet werden. Bei dem Test des Drehzahlregelkreises ist aufgefallen, dass der verwendete Encoder nur eine Spur besitzt. Da zum Testzeitpunkt kein Encoder mit zwei Spuren zur Messung von beiden Drehrichtungen des Gleichstrommotors zur Verfügung stand, musste dies zur Unterscheidung durch die Software erfolgen. Die Überlagerte Positionsregelung wurde aufgrund des Prototypenstatus der autonomen Flugdrohne und aus Zeitgründen nicht ge-

testet. Ein Problem stellte sich während der Untersuchung des abzuwickelnden Kabels ein. Unter der Berücksichtigung, dass die Länge des Kabels durch den Sinus Hyperbolicus abgebildet wird, würde dadurch die geforderte Höhe nicht erreicht werden. Nur durch das Hinzufügen eines künstlichen Offsets kann dies kompensiert werden. Durch die Wahl des Offsets entsteht jedoch ein konstanter Fehler für den Erhalt eines homogenen Durchhangs. Eine weitere Erkenntnis ist, dass ein homogener Durchhang erreicht wird, wenn sich die horizontalen und vertikalen Koordinaten im Gleichgewicht befinden. Wenn der Drohne allerdings ein Bereich von bis zu drei Metern gewährt wird, bei gleichzeitiger Höhe von zwanzig Metern, ist dies mit der untersuchten Berechnung von Cosinus Hyperbolicus und der Annäherung durch die Parabel mit einem homogenen Durchhang nicht möglich, da zu jedem Zeitpunkt der Durchhang berechnet werden muss.

Das Abwickeln des Kabels sollte in einem homogenen Durchhang mit geringer Ziehkraft und Belastung der Flugdrohne erfolgen. Durch die Untersuchungen in dieser Arbeit kann das Kabel nur abgewickelt werden, wenn die Flugkoordinaten x und y sich wie die Kettenlinie verhalten. Da dies jedoch nicht immer der Fall ist, weil die Drohne zum Beispiel die Höhe behält und sich auf der horizontalen Achse bewegt, entsteht überschüssiges Kabel. Um dem vorzubeugen, muss zu jedem Zeitpunkt der Durchhang berechnet und dadurch das Kabel abgewickelt werden. Eine genaue Berechnung des Durchhangs bietet in diesem Fall und im Anbetracht der Zeit jedoch keine eindeutige Lösung. Möglicherweise könnte eine experimentelle Annäherung durch den Satz des Pythagoras erfolgen, indem die direkte Entfernung zur Drohne gemessen und ein prozentualer Offset bei der Abwicklung der Kabellänge hinzugerechnet wird. Dies bedarf jedoch weiterer Untersuchungen.

Die Entwicklung des Vierquadrantenchoppers erfolgte ohne große Probleme. Jedoch wurde die Platine absichtlich überdimensioniert, um auf Veränderungen am Testaufbau schnell reagieren zu können. In den weiterführenden Arbeitsschritten könnte die Leistungselektronik effizienter für den Anwendungsfall dimensioniert werden, um so Kosten bei der Platinenherstellung einzusparen. Die Programmierung des Regelalgorithmus sollte das Ausführen von Schleifen verhindern und die wichtigsten Funktionen mittels Interrupts auslösen lassen. Dadurch kann die Geschwindigkeit des Algorithmus verbessert werden. Außerdem sollte ein Encoder mit zwei Spuren zur Überwachung der Position des abgewickelten Kabels verwendet werden.

Diskussion und Schlussfolgerung

Aktuell wird bei Flugversuchen die Steuerung laufend verbessert. Ziel ist es auf der Landeplattform 5cm zentriert zu landen. Weiterhin werden alle Teilsysteme des Coptersystems im Dauertest untersucht und vermessen um die max. möglichen Einsatzbedingungen festzulegen.

Raspberry Pi / ROS-basiertes Low-Cost-Multikamerasystem zum mobilen Einsatz im Feldversuchswesen

Low-Cost Multicamera System based on Raspberry Pi / ROS for mobile use in field trials

Matthias Igelbrink, Axel Höh, Andreas Linz, Arno Ruckelshausen

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

E-Mail: matthias.igelbrink@hs-osnabrueck.de / a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Die Sensor- und Datenfusion spielt in landwirtschaftlichen Anwendungen eine zunehmend bedeutendere Rolle, sowohl für neue Applikationen als auch die Verbesserung der Robustheit der Sensorik unter dem Einfluss variabler Störgrößen. Dies betrifft insbesondere das Feldversuchswesen zur Evaluation von Sensoren zur Messung von Pflanzen-, Boden- oder Umgebungseigenschaften, ein Beispiel ist die Bestimmung von Pflanzenparametern in der Pflanzenzüchtung (Phänotypisierung). Die Anschaffungskosten für diese Sensorsysteme sind in der Regel hoch. Zudem ist man häufig an proprietärere Software gebunden, welche zu einer Abhängigkeit von Firmen oder Lizenzgebühren führt. Hinzu kommt, dass sich die Synchronisierung der Sensordaten sehr schwierig gestaltet. Das hier vorgestellte mobile Multikamerasystem besteht aus Low-Cost Komponenten, basiert auf freier Software, und ist flexibel erweiterbar. Die eingesetzte Middleware ROS (Robot Operating System) verwaltet die Kommunikation zwischen verschiedenen Kameras und Sensoren und versieht jedes Datenpaket mit einem Zeitstempel. Dies schafft die Voraussetzung für eine Daten- bzw. Sensorfusion und stellt somit eine kostengünstige Lösung für eine erste Evaluation von Sensoren auf dem Feld dar.

Deskriptoren: Low-Cost Imaging, Multikamera-Systeme, Sensorfusion, ROS, Raspberry Pi, Open-Source-Software

Abstract: *Sensor- and data fusion gets more and more important in agriculture applications. This applies not only for new applications, it helps also to improve the robustness of sensors and sensor data in the influence of variable disturbance values. In field trials the evaluation of sensors is necessary for measuring plant-, soil- and environmental parameters. A common example is "phenotyping", where many parameters for the characterisation of plants are collected on the field. Usually, commercial sensor systems are expensive, and they are mostly shipped with proprietary software, which can gener-*

ate licence fees. Furthermore, synchronisation between different sensor systems can be a complicated task.

In this paper an easily expandable and portable low-cost multi camera- and sensor system is introduced. The applied middleware ROS (Robot Operating System) manages the communication between all cameras and sensors, and tags every data packages with a timestamp, which is a requirement for the sensor- and data fusion. The open source software and the low-cost components leads to an inexpensive system for first sensor evaluations in field trials.

Keywords: Low-Cost Imaging, Multicamera systems, Sensor fusion, ROS, Rapsberry Pi, Open-source software

1 Einleitung

Die Autoren beschäftigen sich intensiv mit der Thematik der Erfassung von Pflanzenparametern mit Hilfe von Sensoren und Sensorsystemen im Feldversuchswesen (MÖLLER & RUCKELSHAUSEN 2015). Der Schwerpunkt liegt auf der nicht invasiven und präzisen Bestimmung von morphologischen und spektralen Eigenschaften von Pflanzen (BUSEMEYER *et al.* 2013, MAKEEN *et al.* 2012 und PAULUS *et al.* 2015). Üblicherweise sind die Anschaffungskosten der hier genutzten Sensorsysteme sehr hoch. Zudem ist man häufig an eine proprietäre Software gebunden, die die Flexibilität einschränkt und unter Umständen noch Folgekosten in Form von Lizenzgebühren erzeugt. Ein weiterer Nachteil tritt auf, wenn man die Sensoren bzw. die Sensordaten fusionieren will. Hier ist eine Synchronisation erforderlich, die wiederum durch unterschiedliche Software oder Betriebssysteme erschwert wird, oder auch nicht realisierbar ist. Um neue Methoden zur Pflanzenparametererfassung im Feldversuchswesen zu evaluieren, und Sensordaten zu fusionieren, stellt das Low-Cost-Multikamerasystem ein schlagkräftiges Hilfsmittel dar.

Angesichts der Weiterentwicklungen in den Bereichen der Hardwaretechnologie existiert heutzutage eine hohe Verfügbarkeit von Sensoren auf dem Markt. Diese Tatsache sorgt dafür, dass z.B. die Preise für Rechner-/Kamera-Systeme keine wesentliche Rolle mehr spielen. Zudem ermöglichen Fortschritte im Bereich der Open-Source Software eine flexible und unabhängige Lösung für eine Entwicklung von kostengünstigen Sensorsystemen. Im Folgenden wird ein Low-Cost-Multikamerasystem vorgestellt, das mit einer Vielzahl von Kamerasystemen (RGB, NIR, Wärmebild, 3D, etc.) und weiteren Sensoren (GPS, Beschleunigungssensoren, Temperatur, Feuchte, etc.) parallel bestückt werden kann. Basierend auf dem Open Source Framework ROS sind die Komponenten auf einer Kommunikationsebene vernetzt, die optional alle Datenpakete mit einem Zeitstempel versieht, und somit eine Fusion der Daten ermöglicht. Ein erstes System wurde mit 2 RGB-, einer NIR-, einer Wärmebildkamera, und einem GPS-Modul ausgestattet. Die effektiven Kosten liegen hier bei ca. 700€.

2 Multikamerasystem

Verwendete Hardware – Rechner

Die Anforderungen an das Kamerasystem sind neben einer flexiblen Erweiterbarkeit, und Low-Cost auch eine umfassende Softwareunterstützung. Diese Kriterien konnten mit dem Raspberry Pi 3 Model B in Verbindung mit dem Betriebssystem Raspian Jessie erfüllt werden. Der Raspberry Pi verfügt über mehrere Kommunikationsschnittstellen (USB, Bluetooth, WLAN, Ethernet). Hinzu kommen 40 GPIO-Pins für die Einbindung zusätzlicher Sensorik über SPI, I2C oder UART. Für eine spezielle Raspberry-Kamera gibt es eine eigene Schnittstelle (CSI). Da der Raspberry für den schulischen Bereich entwickelt wurde, ist auch das Low-Cost-Kriterium erfüllt. An Software steht kostenlos ein Betriebssystem (Raspian, eine Variante von Debian-Linux) mit all seinen Open-Source-Erweiterungen und –Programmpaketen zur Verfügung. Mit OpenCV, einer weit verbreiteten Bildbearbeitungsbibliothek können die Kameradaten bereits im Multikamerasystem vorverarbeitet werden. Das Framework ROS (Robot Operating System) ist ebenfalls auf dem Raspberry nutzbar und erlaubt einen modularen Systemaufbau und größtmögliche Skalierbarkeit ebenso wie einen einfachen Anschluss an externe PC-Systeme zur Datenauswertung.

Verwendete Hardware - Sensoren

Das Multikamerasystem wurde als Beispiellösung mit vier Kameras realisiert, kann aber nahezu beliebig erweitert werden. Zwei der vier eingebauten Kameras sind RGB-Kameras. Diese können aufgrund ihrer Anordnung auch als Stereokamerasystem für 3D-Imaging verwendet werden. Eine weitere RGB-Kamera besitzt kein NIR-Sperrfilter, kann also nahes Infrarotlicht detektieren und deshalb in Kombination mit einer der beiden anderen RGB-Kameras Informationen über Vegetationsindizes liefern. Die verwendeten RGB-/NIR-Kameras wurden speziell für den Raspberry Pi entwickelt und besitzen einen 5 Megapixel CMOS-Sensor mit einer max. Auflösung von 2592 x 1944.

Das Kameramodul „Lepton“ von der Firma FLIR detektiert Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich 8-14 μm . Es liefert Wärmebilder mit einer Auflösung von 80 x 60 Pixel. Die Temperaturlösung beträgt dabei 50mK.

Zusätzlich zu den Kameras ist ein GPS-Modul integriert, um Informationen über Ortskoordinaten erhalten zu können. Der Einbau weiterer Sensoren ist aufgrund der vielfältigen Anschlussmöglichkeiten der verwendeten Raspberry Pis ebenfalls möglich.

Systemaufbau

Der Hardwareaufbau (**Abbildung 1**) des Multi-Kamerasystems besteht in der Beispiellösung aus vier Raspberry Pis. Davon werden drei Pis als Clients für die Bereitstellung von Sensordaten bzw. als Auswerteeinheit der Kameras verwendet. Der Anschluss der

Raspberry-Kameras erfolgt mittels 15-poligem Flachbandkabel an das Camera Serial Interface (CSI) direkt auf die Platine des Raspberry Pis. Die Wärmebildkamera sowie eventuelle weitere Sensoren werden über die GPIO-Ports angebunden. Der vierte Raspberry Pi dient als Steuereinheit sowie als Server für Ros. Auch das Speichermedium für die aufgenommenen Daten (ein USB-Stick) sowie das GPS-Modul ist hier angeschlossen. Zur einfachen Bedienung des Kamerasystems dient ein Touch-Display am Display Serial Interface (DSI). Für die Datenübertragung zwischen den vier Raspberrys sowie als Interface zu externen PCs wird ein 100 Mbit Ethernet-Switch verwendet.

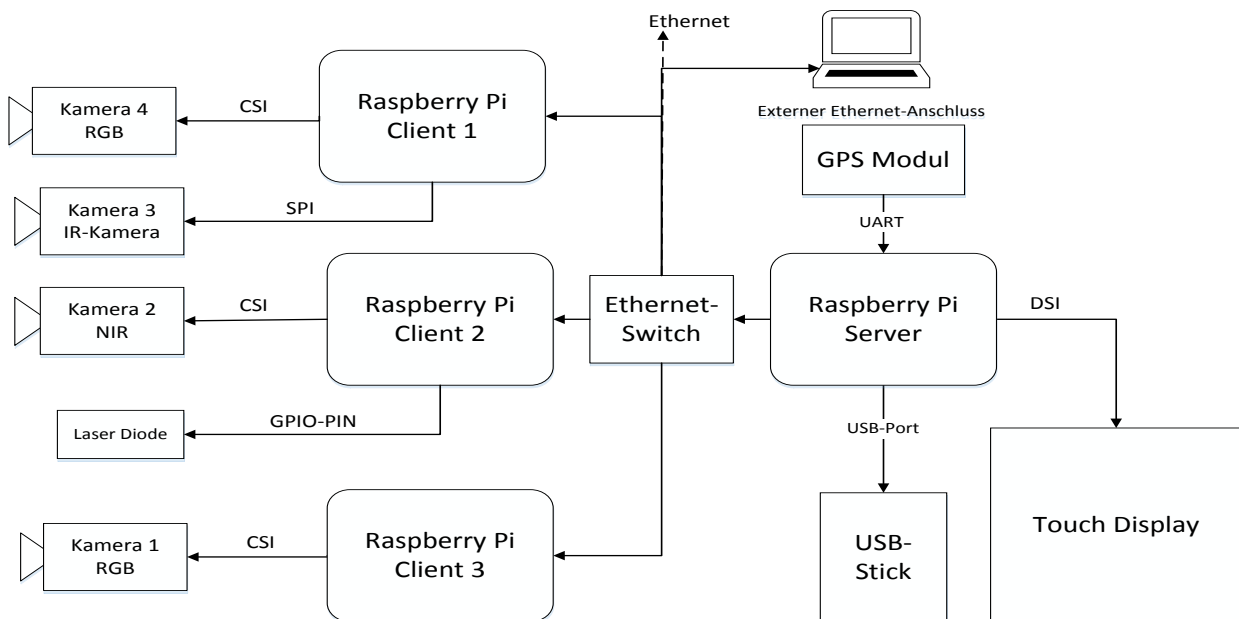


Abbildung 1: Hardwareaufbau

Verwendete Software

Für die selbst erstellte Systemsoftware des Multikamerasystems wurde Python 2.7 verwendet. Python ist eine recht übersichtliche Programmiersprache, die aber durch Einbindung zusätzlicher Bibliotheken (OpenCV, ROS, Hardwaretreiber) erweiterbar und dadurch sehr flexibel ist.

Die interne Kommunikation der Raspberry Pis untereinander sowie die Übertragung von Sensordaten wird über das Robot Operating System (ROS, Version „Indigo“) realisiert. Dabei handelt es sich um ein Framework, das ursprünglich für Roboteranwendungen gedacht war und Kommunikation und Datenaustausch zwischen verteilten Prozessen (Nodes) ermöglicht (QUIGLEY *et al.* 2009). ROS verfügt dafür über zwei Kommunikationsverfahren: eine Service-orientierte, synchrone Kommunikation (Peer2Peer) sowie eine asynchrone Kommunikation für die Übertragung von Sensordaten. Die asynchrone Kommunikation baut auf dem Publisher-Subscriber-Modell auf. Dieses erlaubt die Bereitstellung von Daten eines Publishers über definierte virtuelle Kommunikationsbusse,

auf denen sich ein oder mehrere Prozesse (Subscriber) einschreiben können. Alle Daten sind mit einem Zeitstempel versehen, was eine Synchronisierung der Sensordaten ermöglicht und eine spätere Analyse vereinfacht.

Für die Vorverarbeitung der Bilddaten auf den Raspberry Pis wird OpenCV 2.4.11 verwendet. Diese Bildbearbeitungsbibliothek lässt sich mit ROS und Python kombinieren. Sie zeichnet sich durch eine Vielzahl von Algorithmen sowie eine stetige Weiterentwicklung unter Open-Source-Lizenz aus.

Um eine Bedienung über das Touch-Display zu gewährleisten, wurde eine grafische Benutzeroberfläche programmiert. Dafür wurde die Pythonbibliothek PyQt 4 (Python API für die C++ Klassenbibliothek Qt) verwendet. Qt bietet nicht nur umfangreiche Funktionen für die Programmierung grafischer Oberflächen an, sondern auch eine problemlos Einbindung in das Robot Operating System.

ROS-Netzwerk des Multikamerasystems

Die Kommunikation im ROS-Netzwerk findet zwischen Nodes (Prozessen) statt (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Die Verbindungsdaten der einzelnen Nodes werden über den sogenannten ROS-Master verwaltet. Dabei kann dieser eine beliebige Anzahl an Nodes verwalten. Der Datenaustausch erfolgt allerdings direkt zwischen den Prozessen über Topics (virtuelle Kommunikationsbusse). Im Multikamerasystem bildet jeder Raspberry Pi einen eigenen Node, der jeweils über einen eigenen Service für die Ansteuerung sowie einen definierten Kommunikationsbus für die Bereitstellung von Sensordaten verfügt (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). Dieses Konzept erlaubt einen modularen Aufbau des Systems und ermöglicht eine nahezu beliebige Erweiterung durch zusätzliche Rechner-/Kamera-systeme.

Realisierung des Multikamerasystems

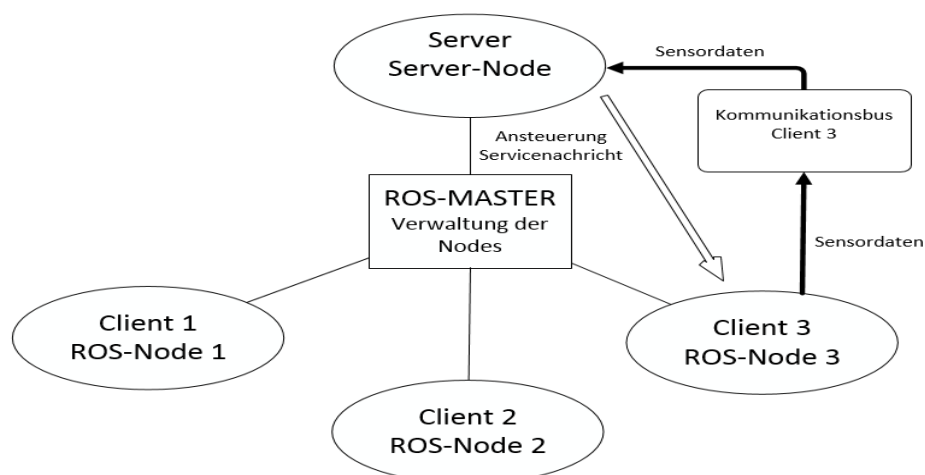


Abbildung 2: ROS-Netzwerk und Ansteuerung

Das Multikamerasystem wurde kompakt in einem gemeinsamen Gehäuse eingebaut (**Abbildung 6**) und ist, unter der Voraussetzung einer ausreichenden Spannungsversorgung, mobil einsetzbar. Das System kann über die grafische Benutzeroberfläche (**Abbildung 6.2**) in Verbindung mit dem Touch-Display leicht bedient werden (**Abbildung 6.1**). Durch den modularen Aufbau (**Abbildung 6**) kann das System ohne großen Aufwand durch weitere Kameras oder zusätzliche Sensorik erweitert werden. Die aktuell implementierten Funktionen des Kamerasystems umfassen Einzelbild-, Vierfachbild-, Mehrfachbild- und Videoaufnahmen (**Abbildung 6.2**). Zudem lässt sich die Bildauflösung frei wählen. Die Framerate variiert je nach eingestellter Auflösung; bei 640 x 480 lassen sich bis zu 20 fps verarbeiten. Über eine implementierte Kameravorschau lassen sich die Bilder auch live anzeigen (**Abbildung 6.1**).

Das GPS-Modul kann über das Menu ein- und ausgeschaltet werden. Die GPS-Daten werden über das ROS-Netzwerk bereitgestellt und stehen somit auch externen Systemen zur Verfügung.

Die Sensordaten lassen für eine spätere Analyse auf der SD-Karte oder einem USB-Stick abspeichern. Des Weiteren kann das System über eine externe Ethernet-Schnittstelle angesteuert und ausgelesen werden.

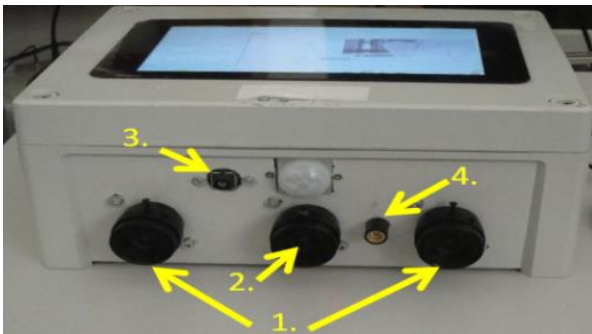


Abbildung 3: Vorderansicht Multikamerasystem, RGB-Kameras (1), RGB+NIR-Kamera (2), Wärmebildkamera (3), Laserdiode (4)

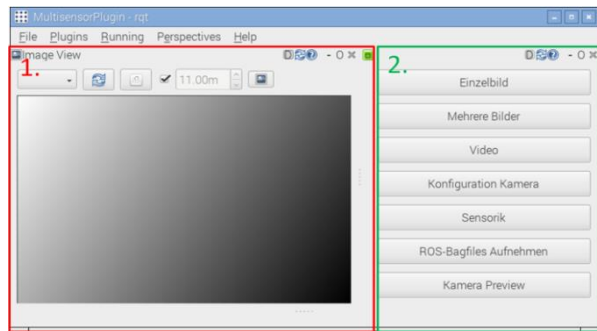


Abbildung 4: Benutzeroberfläche Multikamerasystem, Kameravorschau (1), Auswahlmenu (2)

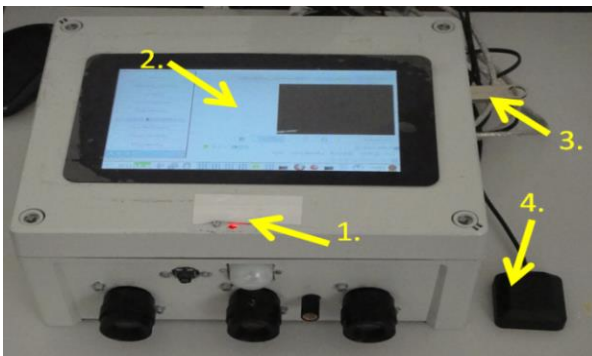


Abbildung 5: GPS-Modul (1), Touch-Display (2), USB-Stick (3), externe GPS-Antenne (4)

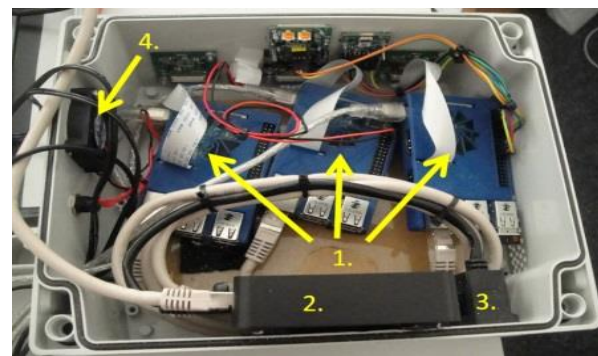


Abbildung 6: Innenansicht Multikamerasystem, Raspberry Pis (1), Ethernet-Switch (2), externe Ethernet-Schnittstelle (3), Lüfter (4)

3 Anwendungsbeispiel

Ziel der Anwendung des Systems ist eine erste Evaluation von (überwiegend) bildgebenden Sensoren und Sensorfusionsansätzen für die darauf aufbauende Entwicklung von kostengünstiger Multi-Sensorsystemen und Algorithmen im Feldversuchswesen (oder anderen Anwendungsgebieten). Dabei können Kamerabilder mit verschiedenen Signaturen, weitere Sensordaten sowie zusätzliche (externe) Daten verwendet werden.

Im nachfolgenden Beispiel wird als klassisches Anwendungsbeispiel die Benutzung von RGB- und NIR-Kamera für die Erstellung eines NDVI-Bildes vorgestellt. Dafür wurden Pflanzen im Außen- und Laborbereich aufgenommen.

Mithilfe der NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index)-Aufnahmen lassen sich Informationen über die Vitalität von Pflanzen gewinnen. Diese Informationen beruhen auf der Tatsache das gesunde Pflanzen im sichtbaren Spektralbereich relativ wenig und im nachfolgenden nahen Infrarotbereich relativ viel Strahlung reflektiert. Dieser Effekt korreliert mit dem vorhandenen Anteil an Chlorophyll in den Pflanzen, was Rückschlüsse auf die photosynthetische Aktivität, Vitalität sowie die Dichte der Vegetationsdecke zulässt.

Die verwendete NIR-Kamera unterscheidet sich von den RGB-Kameras dadurch, dass kein IR-Sperrlichtfilter auf dem CMOS-Sensor angebracht ist. Da sich das übliche Bayer-Pattern trotzdem auf dem Sensor befindet, erhält man statt der drei Farbkanäle „rot“, „grün“, „blau“ nun die Farbkanäle „rot + NIR“, „grün“ und „blau“. Die Kamera detektiert damit einen Wellenlängenbereich von 380nm bis ca. 1000nm (**Abbildung 7.2**), während die RGB-Kamera Wellenlängen im sichtbaren Bereich von 380nm bis 750nm erfasst (**Abbildung 7.1**). Die für die Berechnung benötigten spektralen Informationen im sichtbaren bzw. nahen Infrarotbereich lassen sich mit einer Aufnahme des Multikamerasystems gewinnen. Im Anschluss daran werden beide Bildaufnahmen mit OpenCV in die einzelnen Farbkanäle zerlegt und nur die Farbkanäle „rot“ bzw. „rot + NIR“ verwendet. Da die Information „NIR“ nicht separat vorliegt, wird die Gleichung (1) etwas abgewandelt zu Gleichung (2), was aber natürlich den gleichen Wert ergibt:

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot} \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$NDVI = \frac{(Rot + NIR) - 2x(Rot)}{Rot + NIR} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Das daraus gewonnene NDVI-Bild (**Abbildung 7.3**) wurde für eine übersichtlichere Darstellung mittels OpenCV noch in ein Falschfarbenbild umgewandelt (**Abbildung 7.4**, **Abbildung 8.4**). Dabei gibt rot einen hohen NDVI an, während blaue Bereiche einen niedrigen NDVI aufweisen

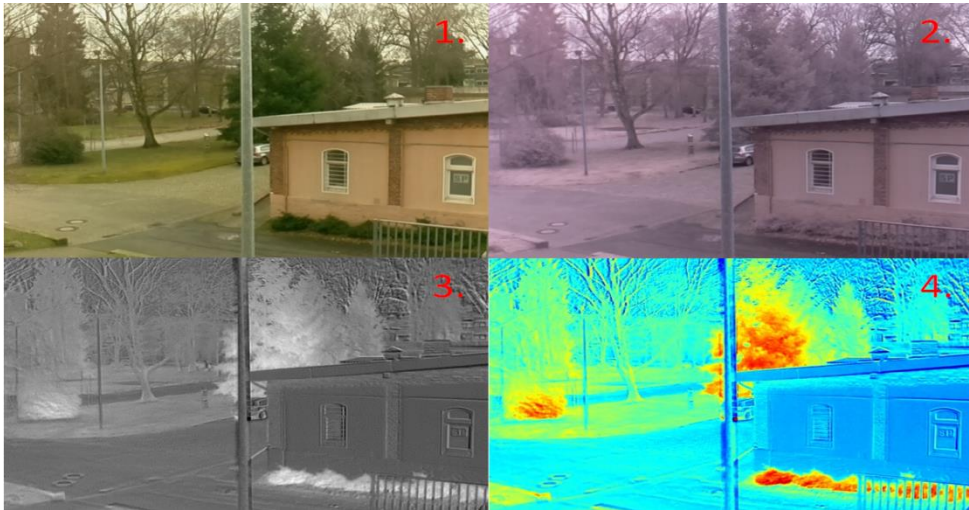


Abbildung 7: Außenaufnahme, RGB-Bild (1), NIR-Bild (2), NDVI (3), Falschfarbenbild NDVI (4)

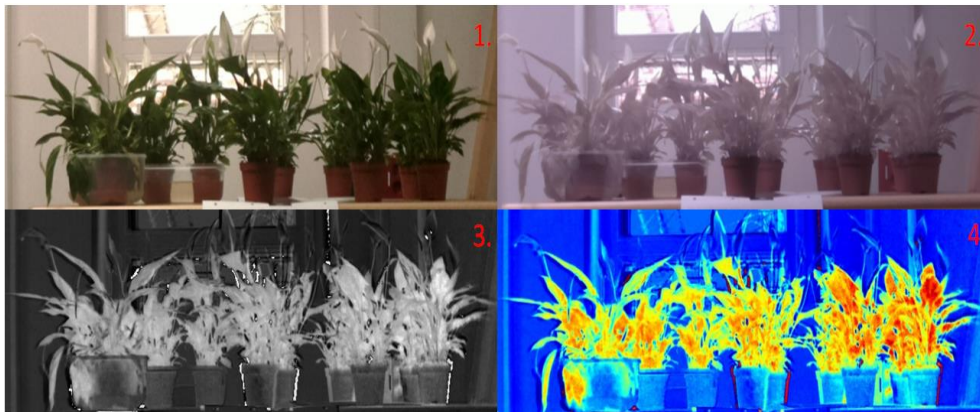


Abbildung 8: Pflanzen im Labor, RGB-Bild (1), NIR-Bild (2), NDVI (3), Falschfarbenbild NDVI (4)

4 Ausblick

Obiges Beispiel zeigt eine erste, im Pflanzenbau übliche Anwendung. Da die Anzahl der eingebunden Sensoren nahezu unbegrenzt ist, sind weitere Szenarien, bzw. das mitloggen zusätzlicher Information möglich. Denkbare Sensorinformationen wären Temperatur, Druck, Feuchte, Helligkeit, etc. Das eingebaute GPS-Modul bietet die Option die erfassten Daten direkt mit den Orts- und Zeitkoordinaten zu verknüpfen. Des Weiteren kann der eingebaute Kreuzlinienlaser für eine optische Markierung zu Kalibrierungszwecken oder für eine Entfernungsmessung durch Triangulation genutzt werden. Da alle gespeicherten Datenpakete mit Zeitstempeln versehen sind, können bei einer späteren Auswertung die Bilder der beiden RGB-Kameras synchronisiert und zur Berechnung eines Tiefenbildes aus Stereobildern verwendet werden. Dies ist möglich, da der Abstand zwischen beiden Kameras bekannt ist. Aus pflanzenbaulicher Sicht ist auch die bildgebende Temperatur der Blattoberfläche oder des Bodens interessant. Diese Informationen werden durch das FLIR-Modul zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

- BUSEMEYER 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.
- MAKEEN K., KERSSSEN S., MENTRUP D., OELMANN B., RUCKELSHAUSEN A. (2012):** Multiple Reflection Ultrasonic Sensor System for Morphological Plant Parameters, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 78, 2012, S. 110-116.
- MÖLLER K., RUCKELSHAUSEN A. (2015):** "Datenmanagement für Ultra-High-Precision-Phenotyping in Feldversuchen", in: Ruckelshausen A., Schwarz H.-P., Theuvsen B. (Hsrg.): *Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft, Referate der 35. GIL-Jahrestagung*, 23.-24. Februar 2015, Geisenheim, S. 117-120, ISBN 978-3-88579-632-9.
- PAULUS S., DORNBUSCH T., NAGEL K. (2015):** Introducing multi-sensor platforms for detailed characterization of plant canopies during the entire growing season, 2015, ATB Workshop Potsdam, Internet: http://www.lemnatec.com/fileadmin/user_upload/PDFpool/LemnaTec_article_CBA_UAS_Paulus.pdf
- QUIGLEY M., GERKEY B., CONLEY K., FAUST J., FOOTE T., LEIBS J., BERGER E., WHEELER R., NG A. (2009):** ROS: an open-source Robot Operating System. *Journal ICRA workshop on Open-Source Software*, Internet: <http://www.willowgarage.com/sites/default/files/icross09-ROS.pdf>

Evaluierung der Sensorik an aktuellen Feldphänotypisierungsanlagen

Sensor evaluation in state of the art field phenotyping platforms

Stefan Paulus, Christopher Schardt, Hans-Georg Luigs, Solmaz Hajmohammadi, Tino Dornbusch

LemnaTec GmbH, Pascalstr. 59, 52076 Aachen,
E-Mail: [stefan.paulus|christopher.schardt|hans-georg.luigs|solmaz.hajmohammadi|tino.dornbusch]@lemnatec.de

Zusammenfassung: In den vergangenen Jahren wurden vermehrt krangebundene Multisensorsysteme benutzt, um phänotypische Daten auf der Feldebene zu sammeln und zu analysieren. Dies geschieht mittels RGB-, Hyperspektral-, oder 3D Sensoren, kombiniert mit Umweltsensoren, die die Umgebungsdaten tracken. Es kommen Sensor-kombinationen zum Einsatz, deren Einzelsensorik nicht nur beim Einbau, sondern auch auf dem Feld, kontinuierlich während des praxisnahen Einsatzes getestet werden muss. Einige Sensoren lassen sich durch die Überdeckung der Wellenlängen untereinander vergleichen. Andere müssen an definierten Testobjekten evaluiert werden. Die Nutzung von kalibrierten und wiederholt evaluierten Sensoren ist die Grundvoraussetzung für den Vergleich von phänotypischen Daten aus verschiedenen zeitlichen Aufnahmen, verschiedenen Sensoren und verschiedenen Experimenten.

Diese Publikation führt in die Evaluierung der Sensoren einer krangebundenen Multi-sensorplattform zur Phänotypisierung von Pflanzen auf dem Feld ein. Sie zeigt auf, wie die Kalibrierung der Sensorik evaluiert wird und wie feste Evaluierungsroutinen im Betrieb verankert werden können. Die Einzeltests können als Grundlage für die permanente Sensorüberwachung angesehen werden.

Deskriptoren: Feldphänotypisierung, Multisensorsysteme, Validierung

Abstract: *Recently more and more gantry based multi sensor platforms were used to collect and analyze phenotypic data on field scale utilizing RGB, Hyperspectral and 3-D sensors. To correlate sensor data with environmental conditions special sensors combinations were used.*

These combinations have to be validated, not only after installation, furthermore before the field experiments and later in a periodical way during the practical use. Some sensors can be compared to other sensors within the multi sensor platform as they meas-

ure in a similar wavelength. Others require well defined and manufactured test specimens for evaluation.

The use of calibrated and repeated evaluation of these sensors is a prerequisite for a comparison of phenotypic data coming by different sensors from different points in time and belonging to different experiments.

This publication introduces the evaluation of sensors carried by a gantry based multi sensor platform for plant phenotyping on field scale. It shows the calibration of sensors, its evaluation and the integration of fixed test routines in the daily workflow. Single tests can be seen as a basis for a more permanent sensor quality control.

Keywords: field phenotyping, multi sensor systems, sensor validation

1 Einleitung

Die Nutzung hochpräziser Aufnahmen von Pflanzendaten zur Phänotypisierung ist seit kurzer Zeit mit dem Aufbau der ersten Multisensorplattformen auf Kranbasis auf der Feldebene angekommen (DORNBUSCH *et al.* 2015, PAULUS *et al.* 2015). Das erste System dieser Art wurde über einem Versuchsfeld der Größe 100x10m aufgebaut. 48 Einzelplots mit verschiedenen Genotypen wurden angepflanzt und durch verschiedene Sensorsysteme beobachtet. Im Gegensatz zur breiten Anwendung von Koptern und der Nutzung von niedrig auflösenden Kameras bietet die Nutzung einer Kranstruktur den Vorteil bei einer Nutzlast von ca. 1000kg sehr frei bei der Sensorwahl zu sein. Dies führt dazu, dass hochpräzise Kameras ins Feld geführt werden können (SADEGHI-TEHRAN *et al.* 2017). Zusätzlich kann eine solche Sensorbox neben einer Vielzahl verschiedener Sensoren verschiedene Umweltsensoren mitführen, die die aufgenommenen Daten mit Informationen zu Wind, Wetter, Klima und Sonnenstand sowie –einstrahlung ergänzen. Die Nutzung hochpräziser Sensorik in der Phänotypisierung wurde in der Vergangenheit ausschließlich auf Labor- oder Gewächshausebene oder mit Einzelsensoren auf dem Feld durchgeführt (PAULUS *et al.* 2014a). Dabei lassen sich die Ergebnisse aus dem Labor nicht sofort auf das Feldexperiment übertragen, da hier weitere Faktoren hinzukommen. Gleiches gilt für die Übertragung der Sensorik auf das Feld. Die Nutzung der Sensoren setzt eine Validierung nach dem Einbau und danach in periodischen Abständen voraus, um eine präzise Funktion der Sensorik zu gewährleisten. Die Validierung eines aktuelleren Systems der Feldgröße 200x20m wird in dieser Publikation vorgestellt.

2 Material und Methoden

In der hier vorgestellten Feldphänotypisierungsanlage kann ein Versuchsfeld der Größe 200x20m befahren und Daten mit verschiedensten Sensoren aufnehmen werden. Dabei ist der Großteil der Sensorik an einer in der Höhe verstellbaren Achse montiert, so dass der Arbeitsabstand der Sensorik angepasst werden kann (**Abbildung 1**). Insgesamt

sind in der Feldanlage 3 Paare Stereokameras, 3 Paare Laserscanner, ein PSII Sensor, zwei Hyperspektralkameras, eine Thermalkamera, sowie jeweils zwei NDVI und PRI Sensoren und ein CropCircle Sensor verbaut. Zusätzlich wurden Umweltsensoren für die photoaktive Bestrahlung (PAR), eine Wetterstation und ein Spektrometer verbaut, weiterhin Leuchtmittel für die passende Ausleuchtung der Objekte.

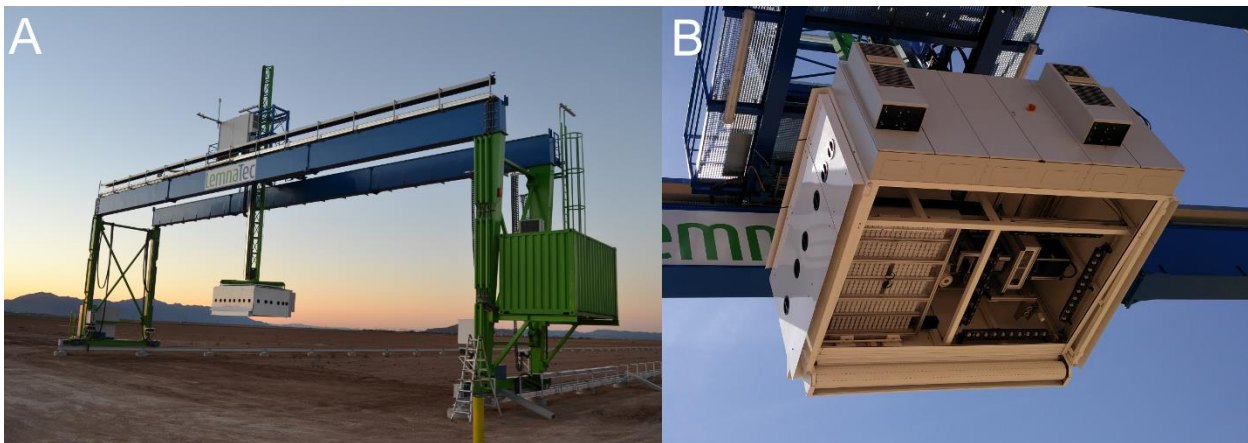


Abbildung 1: Das System zur Feldphänotypisierung nimmt Daten von einem Feld der Größe 20x200m auf. Der Großteil der Sensorik ist in einer wettergeschützten Sensorbox untergebracht. Durch die hohe Flexibilität des Kransystems kann der Höhe der Sensorbox passend zum Arbeitsabstand der Einzelsensorik angepasst werden.

In dieser Publikation wird insbesondere auf die Validierung der 3D Laserscanner, der Hyperspektralkamera und der Thermalkamera eingegangen (**Tabelle 1: technische Spezifikation der Sensorik**). Laserscanner ermöglichen die Ableitung geometrischer Parameter (PAULUS *et al.* 2014b) wie bspw. Wuchshöhe, Blattfläche oder Ähreigenschaften. Hyperspektrale Kameras zielen auf die Unterschiede im Reflektionsverhalten bei unterschiedlichen Wellenlängen und ermöglichen die Erkennung von Trockenstress oder Krankheiten (MAHLEIN *et al.* 2012). Thermalkameras zeigen Temperaturunterschiede in den verschiedenen Pflanzenorganen auf und ermöglichen eine frühe Detektion von Krankheiten (MAHLEIN 2016)

Zur Validierung der 3D Laserscanner wurde ein präzise gefertigtes Referenzobjekt vermessen. Dieses Objekt weist ebene Flächen in verschiedener Ausrichtung auf. In der resultierenden Punktwolke wurden durch einen least-square Ansatz (DUPUIS & KUHLMANN 2014) ausgleichende Flächen berechnet und die Abstände der Messwerte evaluiert. Durch die Anordnung der Ebenen auf unterschiedlichen Höhen und mit unterschiedlicher Ausrichtung kann die Genauigkeit in allen drei Achsen bewertet werden. Die Nutzung von Scans bekannter Geometrie und die Erstellung eines Soll-Ist-Vergleiches ist ein etabliertes Verfahren in der Messtechnik (PAULUS *et al.* 2014b).

Die Hyperspektralkamera misst im Wellenlängenbereich von 400-1000nm. Da es sehr aufwendig und teuer ist ein vergleichbares Messgerät aufzubauen, wurde ein hochge-

naues punktuell messendes Spektrometer benutzt, um Referenzdaten zu liefern. Dazu wurde ein uniform strahlendes Referenzmaterial (95% Reflektanz) bei gleicher Beleuchtung und in zeitlich kurzer Abfolge mit der Hyperspektralkamera und dem Spektrometer gemessen.

Tabelle 1: technische Spezifikation der Sensorik

	<u>Laserscanner</u>	<u>Hyperspektralkamera</u>	<u>Thermalkamera</u>
Hersteller:	Fraunhofer Gesellschaft	Headwall Photonics Inc.	Flir Systems Inc.
Auflösung:	>0,5mm	6,5 microns	0,05°C
Arbeitsbereich:	1m	400-1000nm	7,5-14µm
Phänotypischer Parameter:	Wuchshöhe, Volumina	Vegetationsindex (NDVI, etc)	Pflanzentemperatur

Wärmebildkameras messen die vom Objekt emittierte Infrarotstrahlung. Daher müssen Objektgeometrie und deren Materialeigenschaften bekannt sein, um Rückschlüsse auf die Oberflächentemperatur ziehen zu können. Die wichtigste Materialeigenschaft ist die Emissivität eines Objektes. Sie gibt die Fähigkeit eines Materials an die absorbierte Wärme als Strahlung abzugeben. Für eine Validation einer Wärmebildkamera bezüglich der Temperaturumrechnung kann ein Hohlraumstrahler verwendet werden, bei dem die Emissivität 1 beträgt. Die Genauigkeit der Thermalkamera kann durch eine Korrelation der Messwerte überprüft werden. Dazu müssen die Intensitätswerte der Kamera in Temperaturwerte umgerechnet werden. Erst dann liegen beide Werte in der gleichen Einheit vor. Für reale Bedingungen muss dieser Wert je nach Untergrund / Beschaffenheit des Materials neu bestimmt werden. Die thermal messende Kamera wurde durch ein passendes Testobjekt evaluiert (**Abbildung 2**). Darin wurde die Temperaturmessung auf einer definierten Oberfläche mit einem Referenzthermalsensor durchgeführt. Durch die Nutzung der nebeneinanderliegenden Thermal- und RGB-Kamera konnte bei der Auswertung auf zeitlich dicht aufeinanderfolgende Bilder beider Kameras zurückgegriffen werden.

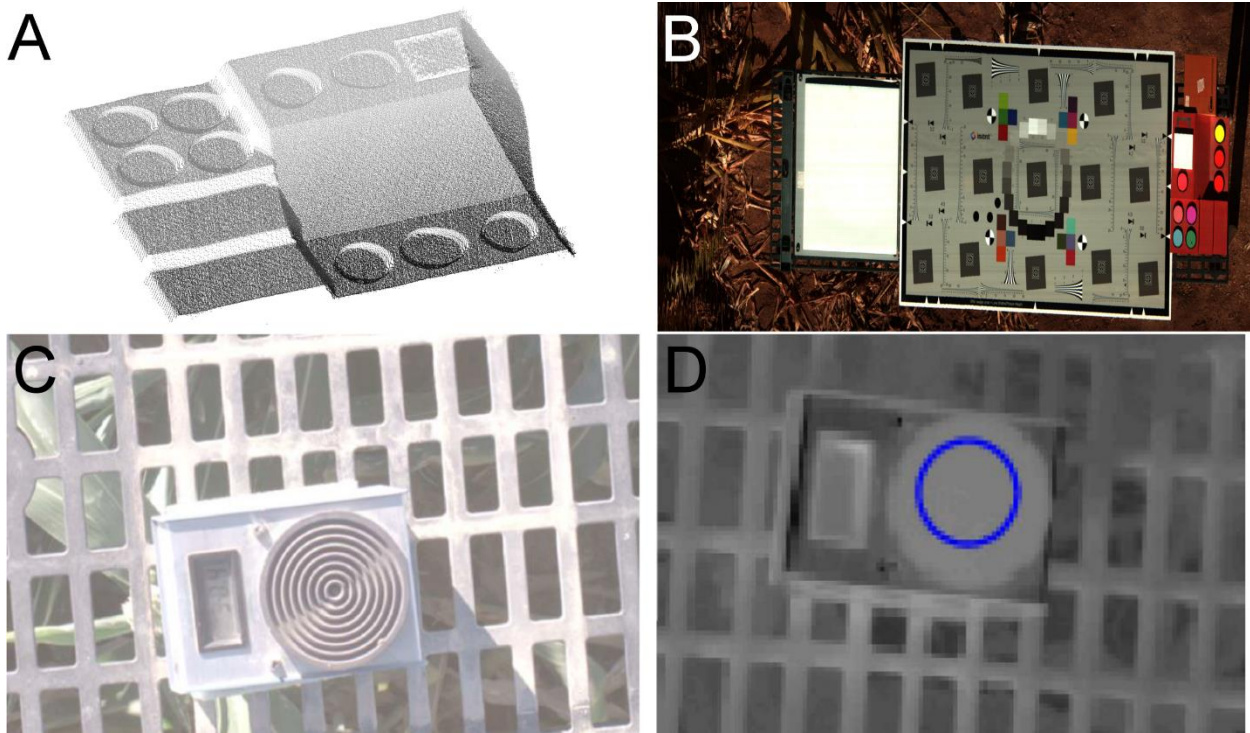


Abbildung 2: Für jeden Kamertyp wird ein geeigneter Referenzkörper vermessen. Für den Laserscanner kommt ein präzise gefertigtes Metallobjekt zum Einsatz (A), für die Hyperspektralkamera ein hochreflektierender Spectralon Standard (B, RGB Ableitung eines zeilenweise aufgenommenen Hyperspektralkubus) und für die Thermalkamera ein geeigneter Testkörper der intern die Temperatur misst (C&D).

3 Ergebnisse

Der Scan des 3D Testobjektes und die anschließende least-square Schätzung der Ebene führten zur Berechnung der Abstände der Einzelscanpunkte zur berechneten Ebene. So konnten Abstandsverteilungen für die verschieden ausgerichteten Ebenen generiert werden. Durch die Berechnung von Mittelwert und Varianz war es möglich, die Genauigkeit der Sensoren, wie sie vom Hersteller angegeben wurden, zu validieren. Die Verteilungen der Abweichungen zeigen, dass die Messungen deutlich unter der geforderten Grenze von 1mm liegen und somit den Anforderungen für die 3D Vermessung auf Feldebene genügen (**Abbildung 3**).

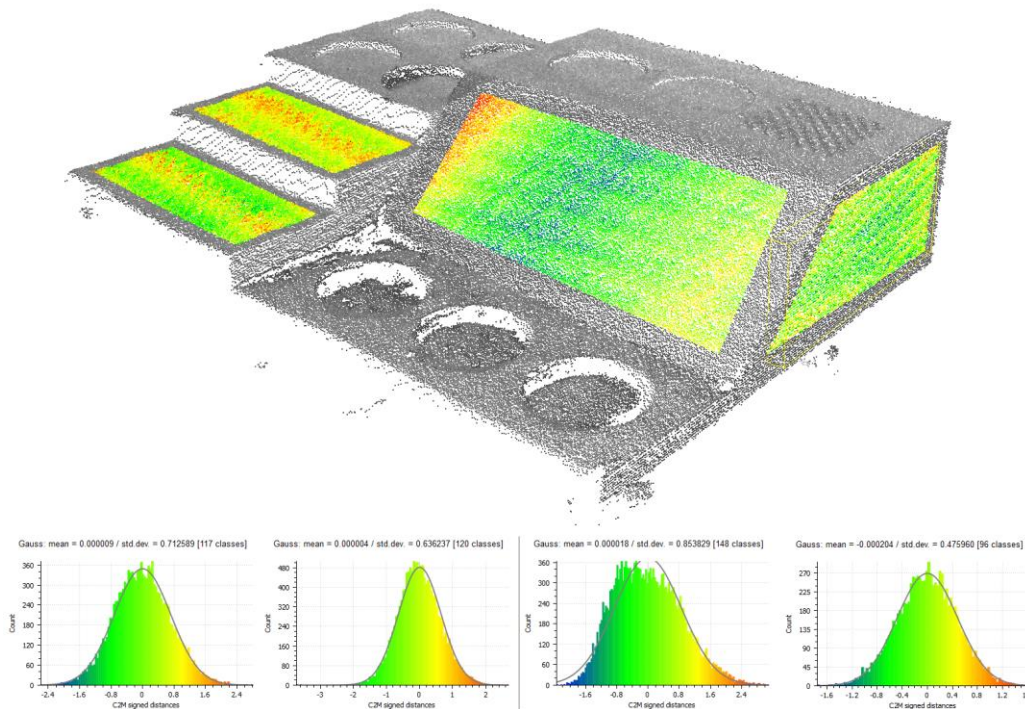


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt den 3D Scan des Testkörpers als Punktwolke (oben). Dabei sind die Abweichungen entsprechend ihres Wertes eingefärbt. Hohe positive Abweichungen sind gelb/rot, hohe negative Abweichungen sind blau. Die Beobachtungen der Einzelflächen sind nebeneinander zu sehen und in der Reihenfolge linke obere Stufe, linke untere Stufe, seitliche Querfläche, rechte Seitenfläche. Alle Einzelmessungen zeigen Abweichungen weit unter der geforderten Grenze von 1mm.

Die Daten der Hyperspektralkamera konnten anhand der Aufnahme des Testkörpers mit dem punktmessenden Spektrometer verglichen werden. Die Gegenüberstellung der beiden Spektren zeigt deutlich die Korrelation zwischen beiden Messungen. Abweichungen lassen sich der unterschiedlichen Sensorempfindlichkeit und der unterschiedlichen Öffnungswinkel der Sensoroptik zuschreiben. Wichtig ist hierbei, dass die interessanten Bereiche und Charakteristika der pflanzlichen Reflektion wiedergegeben sind (**Abbildung 4**). Dazu zählt der Bereich der Chlorophyll- und Wasserabsorption, sowie Bereiche die als Proxy für Stickstoffvorkommen und Seneszenz gelten. Abweichungen in den Messungen lassen sich den unterschiedlichen Öffnungswinkeln der Messgeräte und dem hohen Einfluss des Messwinkels zuschreiben.

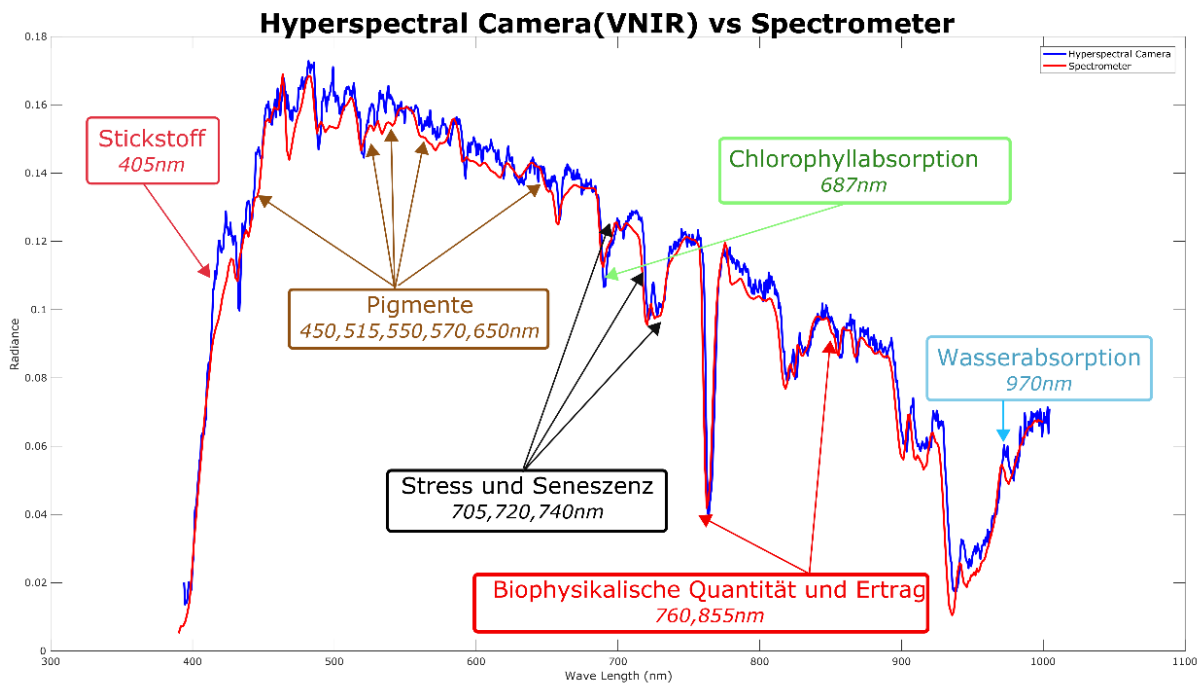


Abbildung 4: Der Vergleich der Hyperspektralkamera mit dem externen Spektrometer zeigt eine sehr hohe Korrelation. Die Wellenlängen mit besonderer Aussagekraft für bspw. Stickstoffgehalt, Absorptionsverhalten oder Seneszenz sind hier besonders gekennzeichnet.

Die Genauigkeit der Thermalkamera kann durch eine Korrelation der Messwerte überprüft werden. Dazu müssen die Intensitätswerte der Kamera in Temperaturwerte umgerechnet werden. Erst dann liegen beide Werte in der gleichen Einheit vor. Zur Umrechnung wurde hier die Emissivität des Testkörpers mit ~ 1 angenommen. Für reale Bedingungen muss dieser Wert je nach Untergrund / Beschaffenheit des Materials neu bestimmt werden. Für das hier gezeigte Experiment ergab sich eine sehr hohe Korrelation von $R^2 = 0,98$ (**Abbildung 5**). Somit kann die Funktion der Thermalkamera belegt werden.

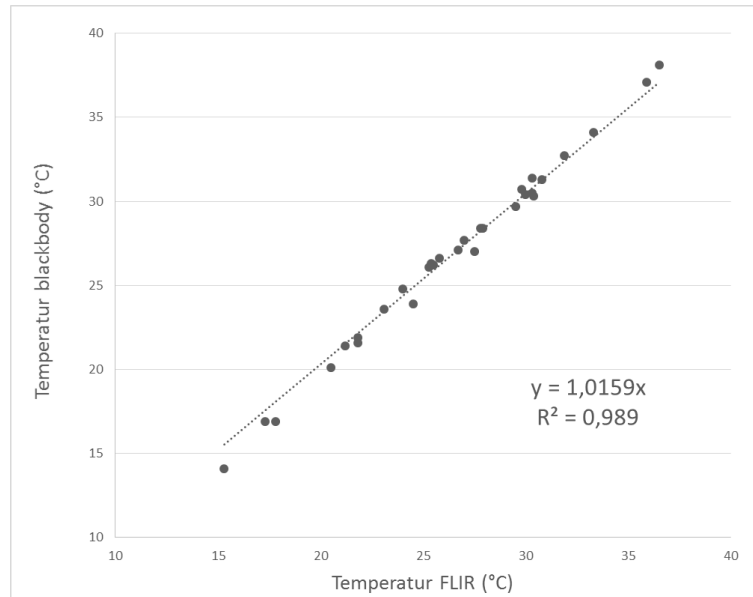


Abbildung 5: Der Vergleich zwischen Thermalkamera und gemessener Temperatur am Testobjekt zeigt eine sehr hohe Korrelation (0,98). Zu beachten ist, dass der Emissivitätswert von ~1 nur für die besonders gefertigte Fläche am Testobjekt (BlackBody) gilt.

4 Conclusio

Die oben beschriebenen Verfahren zur Validierung der Thermal-, Hyperspektral- und 3D Sensorik eines feldgebundenen Multisensorsystems lassen sich zum einmaligen Test oder auch zur periodischen Überprüfung der Genauigkeit einsetzen. Sind die Tests bisher nur manuell durchführbar stellen sie die Basis für eine automatisierte Überprüfung dar. Dann kann diese Kontrolle mit Beginn der Messung zu einem neuen Experiment oder sogar täglich durchgeführt werden. Nur so lässt sich eine verlässliche Qualitätskontrolle der hochgenauen Einzelsensoren auf Feldebene gewährleisten. Die beschriebenen Verfahren lassen sich auf Sensoren eines anderen Genauigkeitsbereiches (Laserscanner), anderer spektraler Wellenlängen (Hyperspektralkameras) und weiterer Anwendungsgebiete (Precision Agriculture) mit geringen Anpassungen übertragen.

Literaturverzeichnis

- DORNBUSCH T., HAWKESFORD M., JANSEN M., NAGEL K., NIEHAUS B., PAULUS S., RADERMACHER M., SABERMANESH K., SADEGHI-TEHRAN P., SCHARDT C., VIRLET N. (2015):** Digital Field Phenotyping by LemnaTec. Technical Report, 1-48.
- DUPUIS J., KUHLMANN H. (2014):** High-Precision Surface Inspection: Uncertainty Evaluation within an Accuracy Range of 15µm with Triangulation-based Laser Line Scanners (2014), Journal of Applied Geodesy 8(2): 109-118
- MAHLEIN A.-K. (2016):** Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping (2016), Plant Disease, 100:2, 241-251

- MAHLEIN A.-K., STEINER U., HILLNHÜTTER C., DEHNE H.-W., OERKE E.-C. (2012):** Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant Methods*, 8:3.
- PAULUS S., BEHMANN J., MAHLEIN A.-K., PLÜMER L., KUHLMANN H. (2014a):** Low-Cost 3D Systems: Suitable Tools for Plant Phenotyping (2014). *Sensors* 14,3001-3018
- PAULUS S., DORNBUSCH T., NAGEL K. (2015):** Einführung von Multi-sensor Plattformen zur detaillierten Beschreibung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 2015, 82-91.
- PAULUS S., SCHUMANN H., KUHLMANN H., LÉON J. (2014b):** High-precision laser scanning system for capturing. *Biosystems Engineering* 121, 1-11.
- SADEGHI-TEHRAN P., SABERMANESH K., VIRLET N., HAWKESFORD M. (2017):** Automated Methode to Determine Two Critical Growth Stages of Wheat: Heading and Flowering. (2017) *Frontiers in Plant Science*, 8:252

Application of RGB imaging in monitoring quality changes of sweet potatoes during drying

D.I. Onwude^{1,2}, N. Hashim^{1*}, K. Abdan¹, S.N. Che Adan¹, A. Jalaluddin¹

¹ Department of Biological and Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Universiti Putra, Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia.

² Department of Agricultural and Food Engineering, Faculty of Engineering, University of Uyo, 52021 Uyo, Nigeria.

E-Mail: norhashila@upm.edu.my

Abstract: *This study investigated the potential of using optical imaging method in monitoring the quality attributes of sweet potatoes during drying. Digital images of sweet potatoes were captured after every 1 hour of drying at drying temperatures of 50 - 70°C and slice thickness of 2 - 6 mm, respectively. Similarly, reference properties i.e. moisture content and colour coordinates were measured at the same drying conditions and time interval, using conventional methods. It was observed that there was a very strong correlation between the optical properties and the measured quality properties at different drying temperatures and slice thickness. Area, elongation, intensity and RGB parameters of sweet potatoes showed good correlation with moisture content and L^* , a^* , b^* values for all drying conditions with $R^2 > 0.7$. Thus, this study has shown that RGB imaging can serve as a non-destructive tool for detecting the changes in quality parameters of agricultural products during drying.*

Keywords: *Drying; Image analysis; Digital imaging, Sweet potatoes; Quality attributes*

Copernicus 4ECA Satellitenfernerkundung zur Inventarisierung potentieller ökologischer Vorrangflächen auf Minderertragsarealen in Agrarlandschaften

Christoph Sinn¹, Matthias Stängel², Sandra Lohberger², Burkhard Golla¹, Jonas Franke²

¹ *Julius Kühn-Institut, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, Deutschland*

² *Remote Sensing Solutions GmbH*
E-Mail: christoph.sinn@julius-kuehn.de

Vor dem Hintergrund des Nutzens von Ökosystemdienstleistungen für die Landwirtschaft stellen ökologische Maßnahmen, die auf Minderertragsinseln eines Schlages eingerichtet werden, eine attraktive Handlungsoption des landwirtschaftlichen Umweltengagements dar. Diese Minderertragsinseln sind durch hohe Risiken für wiederkehrende Mindererträge charakterisiert.

Diese Areale sind in Folge als ökologische Trittsteine innerhalb groß strukturierter Agrarlandschaft wertvoll. Bislang fehlt es an georeferenzierten Daten zu derartigen Potentialflächen, die ökologische und ökonomische Aspekte verbinden können.

Fernerkundungsdaten aus dem Erdbeobachtungsprogramm Copernicus eröffnen erweiterte Möglichkeiten, durch Zeitreihenanalysen derartiger Minderertragsinseln zu identifizieren.

Nachweis von trockenstressinduzierten Entwicklungsunterschieden zweier Winterweizensorten mittels multispektraler Vegetationsindizes

Detection of drought stress-induced development differences of two winter wheat cultivars using multispectral vegetation indices

Sandra Münzel, Daniela Walch, Oswald Blumenstein

Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Straße 24/25, 14476 Potsdam
E-Mail: smuenzel@uni-potsdam.de

Zusammenfassung: Landwirtschaftlich produzierte Nahrungsmittel stellen für die Erdbevölkerung eine wichtige Ernährungsgrundlage dar. Aufgrund aktueller Klimaänderungen, die vor allem durch Trockenperioden und Temperaturerhöhungen gekennzeichnet sind, sowie durch den Intensivierungsdruck in der Pflanzenproduktion ist ein präzises und nachhaltiges Management der Bewässerung an trockenen Standorten notwendig.

Vorrangiges Untersuchungsziel ist es, einen Beitrag zur Sicherung stabiler landwirtschaftlicher Erträge, unter Berücksichtigung der sich veränderten Niederschlagsmengen und -intensitäten, zu leisten.

Die aktuellen Forschungsaktivitäten sind auf das lokale Monitoring des Pflanzenwachstums auf agrarisch genutzten Flächen fokussiert, um rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Seit Jahrzehnten stützt sich dabei die landwirtschaftliche Praxis auch auf die Nutzung von Fernerkundungsdaten.

Einen vielversprechenden, preisgünstigen Ansatz stellt dabei die Analyse des Vitalitätszustandes von Feldfrüchten auf Grundlage von Spektraldaten handelsüblicher Digitalkameras dar. Unsere Feldforschung basiert auf den Einsatz von zwei handelsüblichen Digitalkameras. Die erste Kamera ist mit einer Optik für das sichtbare Licht ausgestattet, eine zweite nutzt die Spektralbereiche Grün, Blau und Nahes Infrarot.

Untersuchungsraum ist die Region Brandenburg, deren vorrangig sandige Böden eine geringe Speicherfähigkeit gegenüber Wasser aufweisen. Die Experimente konzentrierten sich zunächst auf die Widerspiegelung des Wuchsverhaltens zweier trockenstress-resistenter Winterweizensorten in den relevanten Spektralbereichen bei einem veränderten Wasserangebot. Im Vegetationszeitraum 2016 erfolgte deshalb eine regelmäßige Aufnahme der Entwicklung dieser Kulturen auf Versuchsflächen in Marquardt bei Potsdam. Darüber hinaus wurde eine Auswertung der relevanten Multispektraldaten vorgenommen, wobei verschiedene Vegetationsindizes (NDVI, GNDVI, BNDVI) hin-

sichtlich ihrer Aussagekraft über die Vitalität der Winterweizenpflanzen berechnet wurden.

Im Ergebnis konnten bisher keine Unterschiede in der Entwicklung, hervorgerufen durch fehlende oder vorhandene Bewässerung, ermittelt werden. Als Grund werden vor allem die vergleichsweise hohen Niederschlagsmengen während des Vegetationszeitraums vermutet. Allerdings konnten durch die entwickelte Methode Entwicklungsunterschiede zwischen den beiden Sorten identifiziert werden. Weiterhin war ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den NDVI-Werten und den Chlorophyllmessungen in den Pflanzenblättern erkennbar. Die oft bevorzugte Nutzung des BNDVI erwies sich bei unseren Feldexperimenten als nicht praktikabel, um eine sichere Detektion von Trockenstress in den Weizenbeständen vornehmen zu können. Es ist zu vermuten, dass mögliche Änderungen der Chlorophyllwerte nicht in ausreichendem Maße durch die Reflexionswerte im blauen Spektralbereich des sichtbaren Lichts widergegeben werden konnten. Der BNDVI würde sich somit nur für die Beurteilung von Merkmalen vitaler Pflanzen eignen.

In der Vegetationsperiode 2017 wird das Monitoring der vegetativen Entwicklung von Kulturpflanzen durch regelmäßige Copterbefliegungen mit einer RGB- sowie NIR-Kamera fortgesetzt.

Deskriptoren: Trockenstress, NIR-Kamera, Bewässerung, Hexacopter, Brandenburg

Abstract: *Agricultural foodstuff is an important source of nutrition for the earth's population. Due to current climate changes, that are mainly characterized by drought periods and temperature increases, as well as the pressure of intensification in plant production, a precise and sustainable management of irrigation in dry locations is necessary.*

The primary aim of the investigation is a contribution to the stabilization of stable agricultural yields, taking into account the changed rainfall quantities and intensities.

The current research activities are focused on the local monitoring of plant growth on agricultural land in order to take counter-measures in time. For decades, agricultural practice has also been based on the use of remote sensing data.

A promising, cost-effective approach is the analysis of the vitality of field crops based on spectral data of commercial digital cameras. Our field research is based on the use of two commercially available digital cameras. The first camera is equipped with optics for the visible light, a second uses the spectral areas green, blue and near infrared.

The study area is in the region of Brandenburg, where sandy soils predominantly have a low water storage capacity. The experiments initially concentrated on the reproduction of the growth behavior of two dry stress resistant winter wheat cultivars in the relevant spectral regions with a changed water supply. In the growing season of 2016, the development of these crops was therefore regularly carried out on trial sites in Marquardt near Potsdam. In addition, an evaluation of the relevant multispectral data was carried

out, whereby different vegetation indices (NDVI, GNDVI, BNDVI) were calculated in regard to the vitality of the winter wheat plants.

As a result, no differences in the development caused by lacking or existing irrigation were identified. The reason for this was the comparatively high rainfall during the vegetation period. However, the differences between the development methods of the two varieties could be identified. Furthermore, a clear correlation was found between the NDVI values and the chlorophyll measurements in the plant leaves. The often preferred use of the BNDVI proved to be impractical for our field experiments to ensure a reliable detection of drought stress in the wheat stands. It is to be assumed that possible changes of the chlorophyll values could not be adequately reflected by the values in the blue spectral range of the visible light. The BNDVI would therefore only be suitable for assessing the characteristics of vital plants.

In the growing season 2017, the monitoring of the vegetative development of cultivated plants will be continued by regular copter flights equipped with RGB and NIR cameras.

Keywords: Drought stress, NIR Camera, Irrigation, Hexacopter, Brandenburg

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Dem aktuellen Sachstandsbericht (Assessment Report, AR5) des International Panel on Climate Change (IPCC) nach findet bereits eine globale Klimaerwärmung im Mittel von 0,85°C statt, welche auf regionaler Ebene mit Dürren einhergehen kann (IPCC 2013). Es ist damit zu rechnen, dass der Klimawandel die natürlichen Voraussetzungen für die Landwirtschaft verändern wird. Steigende Temperaturen und rückläufige Niederschlagssummen in den Frühjahresmonaten treffen vor allem den ohnehin schon trockenen Nordosten Deutschlands, besonders die Region Brandenburg (POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG 2012). Wie Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) aufzeigen, kommt es dabei zu einem Rückgang der Ertragszahlen.

Eine Zunahme des Bedarfs an Bewässerung der Kulturen ist angesichts der Erkenntnisse, die aus den Klimamodellen abgeleitet werden können, notwendig. Diese zusätzlichen Wassergaben werden aus wissenschaftlicher Perspektive kritisch gesehen, denn schon jetzt werden im globalen Mittel etwa 70-80% der verfügbaren Süßwasserressourcen für die Bewässerung innerhalb der Landwirtschaft verwendet (HEDLEY & YULE 2011). Jedoch ist eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanze durch das im Boden vorhandene Wasser essentiell für die Nährstoffverfügbarkeit der Pflanzen. Eine Früherkennung von Trockenstress bei Kulturpflanzen ist deshalb von großer Wichtigkeit, um rechtzeitig zielgerichtete Maßnahmen ergreifen zu können.

1.2 Wissensstand

Als Trockenheit wird multidimensionaler Stress bezeichnet, der sich auf die unterschiedlichen Facetten der Pflanzenentwicklung auswirkt (BLUM 1996). Er behindert die ungestörte Funktionsweise regulärer Stoffwechselprozesse sowie die phänologische Entwicklung der Pflanze (SCHOPFER *et al.* 2010). Als eine weitere Folge anhaltender Trockenheit wird eine verfrühte Seneszenz beschrieben. Diese so genannte trockenstress-induzierte Notreife der Pflanzen bewirkt sowohl eine Minderung der Quantität durch unzureichende Fruchtbildung als auch der Qualität, wie beispielsweise der Eiweißgehalte und Backeigenschaften (GÖMANN *et al.* 2017).

Winterweizen (*triticum aestivum*) gehört zu den anspruchsvolleren Kulturpflanzen. Wie alle Weizensorten benötigt er eine gute Wasserversorgung in den Phasen des vegetativen und generativen Wachstums. Äußere Welkesymptome sind vor allem an den Blättern erkennbar (SCHOPFER *et al.* 2010). In der Folge des sinkenden Turgors (Innenwandruck der Zelle) rollen sich die Blätter zusammen und verhärten durch ein größeres Membran-Volumen-Verhältnis (vgl. auch TAIZ & ZEIGER 2007).

Die spektrale Signatur der Vegetation richtet sich nach dem Absorptionsverhalten der Chlorophylle. Bei einem durch Stress ausgelösten Rückgang der Chlorophyllkonzentration ändert sich aus diesem Grund auch das Reflexionsverhalten der Pflanzen (DANGWAL *et al.* 2015). Für Winterweizen hat man in mehreren Studien einen Zusammenhang zwischen mangelnder Wasserversorgung und dem Rückgang der in den Pflanzen photosynthetisch aktiven Farbstoffe wie Chlorophyll a (Chl a) und Chlorophyll b (Chl b) beschrieben (FAROOQ *et al.* 2009, GITELSON *et al.* 2003, FISCHER 2011). Als Folge ergibt sich eine geringere Effizienz in der Nutzung der einfallenden Strahlung und damit einhergehend eine Verminderung der Ernteerträge.

Um den Zustand der Wasserversorgung der Pflanze quantitativ erfassen zu können, sind zwingend Erkenntnisse über den Zusammenhang von Trockenstress und einer Änderung innerhalb der Spektralsignatur erforderlich. Fernerkundungsdaten werden schon seit Mitte des letzten Jahrhunderts genutzt, um Vegetationsflächen zu analysieren. Für die Einschätzung des Vitalitätsstandes werden vor allem multispektrale Vegetationsindizes aus Satellitensystemen verwendet, anhand derer sich die Phänologie und auch Pathologie der Pflanzen nachvollziehen lassen. Die räumliche sowie die zeitliche Auflösung sind bei diesen Methoden relativ gering. So lassen die Aufnahmen keine Differenzierung der Pflanzen eines bestimmten Feldabschnittes in Kontrast zu ihren benachbarten Pflanzen zu. Auch kann meist mit den Satellitendaten keine phänologische Entwicklung der Kulturpflanze spektroskopisch nachvollzogen werden, da die zeitlichen Abstände der Aufnahmen zu weit auseinander liegen. Vor allem die Landwirte sind jedoch auf eben diese präzisen Daten angewiesen.

Die Lösung liefern Sensorsysteme, die vom Boden aus installiert und bedient werden können und zum Teil automatisiert Vegetationsanalysen durch Bildaufnahmen vornehmen. Eine Präzisierung in der Landwirtschaft sollte auf Grundlage von notwendigen Er-

hebungen über den gesamten Kultivierungszeitraum eine Anpassung des Managements durch Teilschlagbewirtschaftung auf den Feldern ermöglichen (KURZ 2003). Optische Systeme zum Monitoring von Pflanzenbeständen sollten für Landwirte erschwinglich sein, um eine breitflächige, ressourcenschonende Bewirtschaftung zu bewirken. Als Alternative wird deswegen seit einigen Jahren der Einsatz von handelsüblichen Digitalkameras im Rahmen verschiedener Studien erprobt. Schwerpunkte dieser Arbeiten lagen vor allem in der Untersuchung des Einflusses von Natriumgaben auf die Pflanzenvitalität (LEBOURGEOIS *et al.* 2012, GEBBERS *et al.* 2013).

1.3 Ziel

Die hier vorgestellte Arbeit hatte zum Ziel, mittels Spektralaufnahmen von zwei Kameras und deren Weiterverarbeitung eine Abschätzung von trockenstressinduzierten Unterschieden in der Phänologie von Winterweizen zu geben. Außerdem sollte diese Methode in ihrer Effektivität und Praktikabilität bewertet werden. Es wurde mit einem eigens zu diesem Zweck erstellten Kamerasystem, bestehend aus zwei handelsüblichen Digitalkameras, gearbeitet (**Abbildung 4**).

Im Mittelpunkt der Untersuchung stand neben der Anwendbarkeit dieses Kamerasystems auch die Aussagekraft der errechneten Vegetationsindizes hinsichtlich des Einflusses von Trockenstress auf die Kulturpflanzen. Zur Ermittlung des NDVI der Winterweizenblätter aus den Aufnahmen über den Blattbestand wurden beide Digitalkameras genutzt. Als Alternative zum NDVI wurden andere Vegetationsindizes (BNDVI, GNDVI) zur Eignung der Ermittlung von Trockenstresssymptomen in den Winterweizenbeständen untersucht, die jeweils nur Spektraldaten einer Kamera benötigten.

Bezüglich der phänologischen Entwicklung und Vitalität sollten zudem Unterschiede zwischen den angebauten Winterweizensorten und der Einfluss von Bewässerung untersucht werden. Gekoppelt an die regelmäßig gewonnenen spektralen Daten waren Felduntersuchungen zum Zustand der Weizenpflanzen.

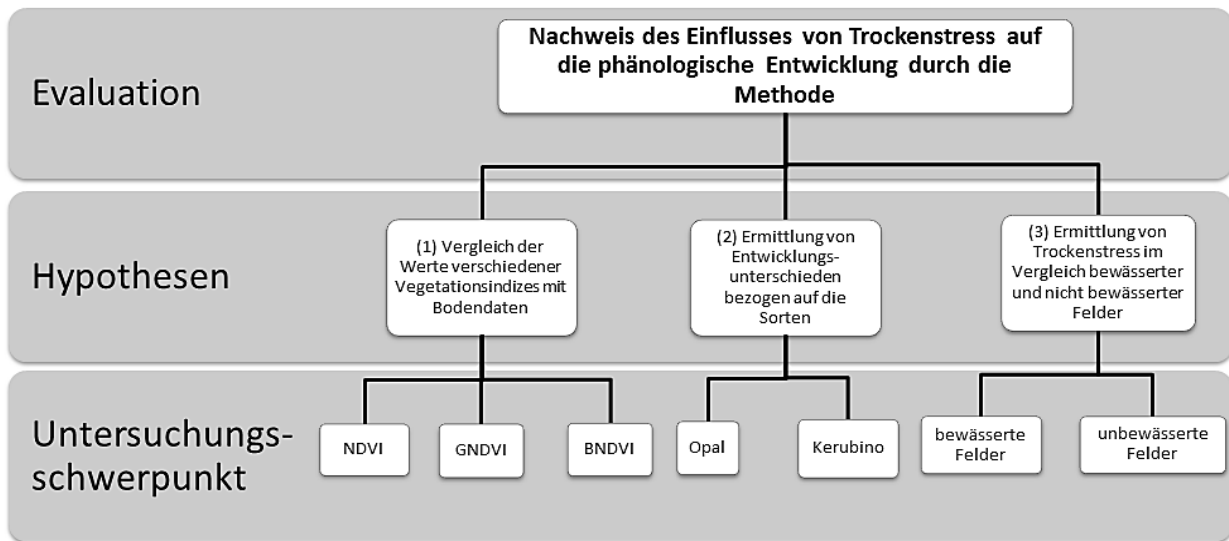


Abbildung 1: Untersuchungsansatz der Arbeit

Als Arbeitshypothese soll folgende Aussage formuliert werden:

Der „red edge“ gilt als eindeutige Kenngröße für Veränderungen in der Vitalität und bezieht sich auf einen starken Anstieg der Reflexion im Übergangsbereich von rotem visuellen Licht und dem nahen Infrarot (KURZ 2003). Da die anderen Indizes diese Veränderung nicht abbilden, muss davon ausgegangen werden, dass der BNDVI und GNDVI für die Detektion von trockenstressbedingten Entwicklungsunterschieden nicht geeignet sind. Es ist zu erwarten, dass sich Unterschiede in den ermittelten Vegetationsindizes auf Arealen mit verschiedener Wasserapplikation zeigen. Für das bewässerte Feld wird ein stabiler Wert über den gesamten Untersuchungszeitraum vorausgesetzt, für die unbewässerte Fläche ist ein Rückgang der Indexwerte zu erwarten.

Zudem sind auch geringfügige Unterschiede zwischen den angebauten Sorten zu erwarten. Die Sorte 'Kerubino' gilt als besonders ertragsreich und resistent. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass die Pflanzen dieser Kultur über einen langen Zeitraum stabile Indexwerte erreichen werden. Die ebenfalls trockenstressresistente Sorte 'Opal' könnte hingegen bezüglich dieser Merkmale weniger stabile Indizes aufweisen, da es sich um eine anfälligeren Sorte handelt, die nicht für den Anbau in trockenen Regionen gezüchtet wurde.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort

Die untersuchten Felder lagen auf den Versuchsflächen des Forschungsstandortes Marquardt (Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. - ATB) bei Potsdam (52°28'01.1"N, 12°57'31.6"E). Es handelt sich um ein glazial geprägtes Gebiet mit

Böden, die einen hohen Sandanteil auf Geschiebemergel aufweisen (vgl. STAFFORD 2013, GEBBERS *et al.* 2013). Eigenen Untersuchungen zufolge bestehen die Böden vor Ort vornehmlich aus Feinsand (45%) beziehungsweise Mittelsand (33%). Der Ton-Anteil im Boden beträgt etwa fünf Prozent.

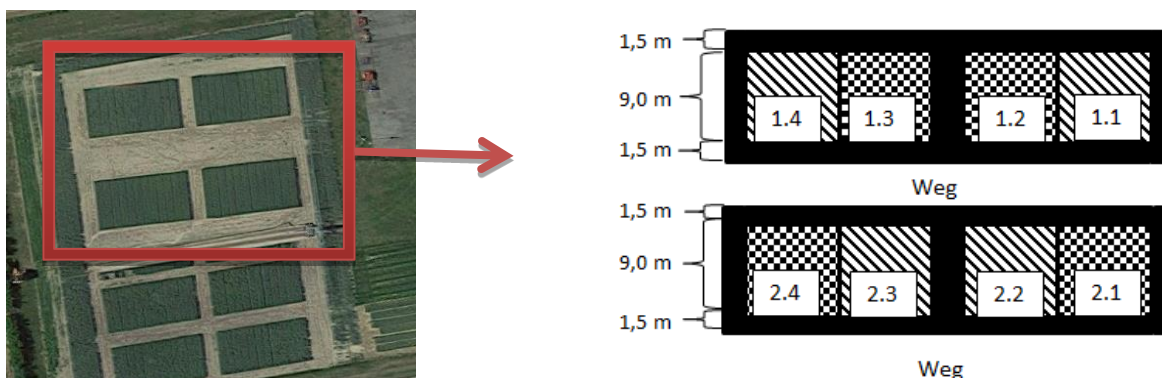


Abbildung 2: Versuchsflächen in Marquardt mit der Feldbezeichnung (1.x unbewässert, 2.x bewässert, kariert = 'Opal'; liniert = 'Kerubino')

Für die Datenerhebung wurden insgesamt 8 Teilflächen (*plots*) angelegt. Diese hatten die Maße von 9 m x 9 m. Die Hälfte der Felder unterlag dabei dem natürlichen Niederschlag, während die andere Hälfte über den gesamten Kulturzeitraum bei Bedarf bewässert wurde. Zusätzlich sind innerhalb der bewässerten und unbewässerten Felder in randomisierter Abfolge die zwei Winterweizensorten 'Opal' und 'Kerubino' gepflanzt worden (**Abbildung 2**). Für die Datenaufnahme der Kameras erfolgte eine Spezifizierung und Festlegung auf einen 40cm langen, quadratischen Bereich innerhalb des aufgenommenen Bildes, indem die Bearbeitung später erfolgen sollte. Die Aussaat des Winterweizens erfolgte im Oktober 2015. Die Felduntersuchungen begannen im April 2016 und endeten im Juli des gleichen Jahres mit der Ernte.

2.2 Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der multispektralen Daten wurden zwei handelsübliche Digitalkameras verwendet: Canon PowerShot S100 und Canon PowerShot S110. Eine der Kameras wurde so modifiziert, dass sie für die Aufnahme der reflektierten Strahlung im Nahinfrarot (NIR) geeignet war. Die von der Firma HEXAPILOTS® vorgenommenen Veränderungen beziehen sich auf den Einsatz eines speziellen Filters. Dieser filtert die reflektierte Strahlung im roten Spektrum des Lichts heraus und erlaubt im Gegenzug die Transmission des Lichts im Nahen Infrarot. So ergibt sich ein Kamerasystem, welches multispektrale Daten liefern kann. Diese ermöglichen die Berechnung der Vegetationsindizes.

Welchen Einfluss diese Modifikation auf die Transmissionskurve der verwendeten Digitalkamera hat, ist in **Abbildung 3** nachzuvollziehen. Während die Transmission in den

Bereichen des blauen, grünen und nahinfraroten Lichts maximal ist, weist die Transmissionskurve im Bereich des roten Lichtspektrums ein Minimum auf.

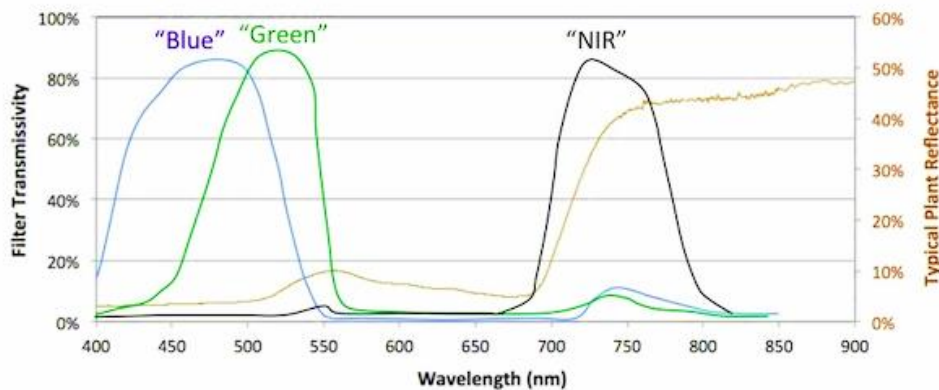


Abbildung 3: Transmissionskurve der verwendeten umgebauten Kamera

Zur Reduktion der räumlichen Unterschiede erfolgte die Befestigung beider Kameras auf einer Aluminiumgleitschiene (**Abbildung 4**). Die Linsen wurden so auf der Schiene ausgerichtet, dass sie sich in kleinstmöglichem Abstand zueinander befinden. Die zwangsläufigen Unterschiede in den Aufnahmewinkeln wurden somit reduziert.



Abbildung 4: Befestigungsweise der beiden Digitalkameras auf der Aluminium-Gleitschiene

Der Aufnahmemodus befand sich an allen Aufnahmetagen in der „Programmautomatik“. Innerhalb dieses Modus orientiert sich das Histogramm an dem hellsten Objekt der Aufnahme und ermöglicht eine vorherige Kalibrierung der Belichtungszeit und Blendeneinstellung. Um die Reflexionswerte der einzelnen Weizenblätter in Bezug zueinander setzen zu können, wurden zusätzlich die Reflexionswerte des Spectralons® erhoben. Während der Versuchszeit waren 182 Bildaufnahmen im Feldversuch mit der jeweiligen Kamera realisiert worden.

Die Ausrichtung beider Linsen führt zu einer leicht zueinander verzerrten Aufnahme, sodass ein Übereinanderlegen beider im Zuge der Analyse nicht möglich ist. Aus diesen Einschränkungen des Kamerasystems ergab sich die Notwendigkeit einer Datenprozessierung für die weitere Analyse der Bildwerte. Hierbei sind innerhalb von ESRI ArcGIS in beiden Aufnahmen Analysepunkte gesetzt worden, aus denen die Spektralinformation extrahiert und anschließend auf den Feldausschnitt gemittelt wurde.

Die quantitative Analyse erfolgte im Anschluss über ein statistisches Verfahren in MS Excel, indem die relativen, normierten Reflexionswerte innerhalb des Kanals miteinander zu den jeweiligen Indizes verschnitten wurden.



Abbildung 5: RGB (links)- und NIR- (rechts) Aufnahmen einer Weizenpflanze

Vor allem die Vegetationsindizes der Laubblätter waren von Interesse, da hier die photosynthetisch aktiven Chlorophylle auftreten. Eine Änderung der spektralen Signatur in diesem Bereich der Pflanze kann mit einem Verlust der Produktivität der Pflanze und somit einem negativen Einfluss auf den Ertrag gleichgesetzt werden.

Aus den Analysen der Bildinformationen wurden die Vegetationsindizes NDVI, BNDVI und GNDVI ermittelt. Einen Referenzwert hierzu bilden die erhobenen Blattgrünwerte des SPAD-Messgeräts. Die durch ein Konica Minolta SPAD-502 bestimmten Werte finden Berücksichtigung in der späteren Auswertung der Spektraldaten. Die SPAD-Werte werden ähnlich den Vegetationsindizes durch die Differenz zweier Wellenlängenbereiche ermittelt (Süß *et al.* 2015). Sie stehen als Index für die relativen Werte des Blattgrüns und können somit als relative Chlorophyllwerte gewertet werden.

Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) wird mithilfe der Medianwerte der relativen Reflexionswerte berechnet. Deshalb wurden die normalisierten Werte des roten Lichts sowie die Werte des NIR für die Berechnung genutzt. In mehreren Studien konnte bereits die Aussagekraft des NDVI für Pflanzenstress bestätigt werden (SEMERÁDOVÁ *et al.* 2013, HENIK 2012, Dangwal *et al.* 2015). Die Werte der Indizes ergeben sich aus einem Unterschied zwischen dem Absorptionsmaximum im visuellen Spektrum und einem Reflexionsmaximum im NIR. Dabei lässt eine Änderung des Wertes direkt auf eine Änderung der Pflanzenvitalität und -produktivität schließen.

$$NDVI = \frac{NIR - rVIS}{NIR + rVIS}$$

Der Green Normalized Difference Vegetation Index wurde mithilfe der Medianwerte der relativen Reflexionswerte ermittelt, indem die normalisierten Werte des grünen sichtbaren Lichts sowie die Werte des NIR für die Berechnung genutzt worden sind.

$$GNDVI = \frac{NIR - gVIS}{NIR + gVIS}$$

Der Blue Normalized Difference Vegetation Index wurde mithilfe der Medianwerte der relativen Reflexionswerte ermittelt. Die Basis für die Berechnung bildeten die Werte des blauen Kanals sowie des NIR.

$$BNDVI = \frac{NIR - bVIS}{NIR + bVIS}$$

3 Ergebnisse

3.1 Anwendbarkeit verschiedener Vegetationsindizes

Die relativen Reflexionswerte, deren Intensitäten in den Bändern rot, grün, blau und NIR erfasst wurden, lassen sich in einem kontinuierlichen Verlauf darstellen. Die Veränderungen innerhalb der Phänologie und Vitalität können über den Untersuchungszeitraum mithilfe des NDVI abgebildet werden. Es traten deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Sorten sowie geringfügige Differenzen zwischen den Bewässerungsformen auf.

Zu Beginn zeigten sich folgende Spektralsignatur: eine Absorption in den Banden des blauen und roten Lichts, eine leichte Reflexion des grünen Lichts sowie eine starke Reflexion des NIR-Lichts (**Abbildung 6**). Im Laufe der folgenden Messungen, vor allem zum Ende des Feldversuches, verändern sich die relativen Reflexionswerte im Bereich des roten Kanals (**Abbildung 7**). Gegenüber dem ersten Termin hat die Reflexion um mehr als das Doppelte des Ursprungswertes zugenommen. Sie kann aufgrund dessen als *quasi spektrale Signatur* für die untersuchten Versuchsfelder angesehen werden.

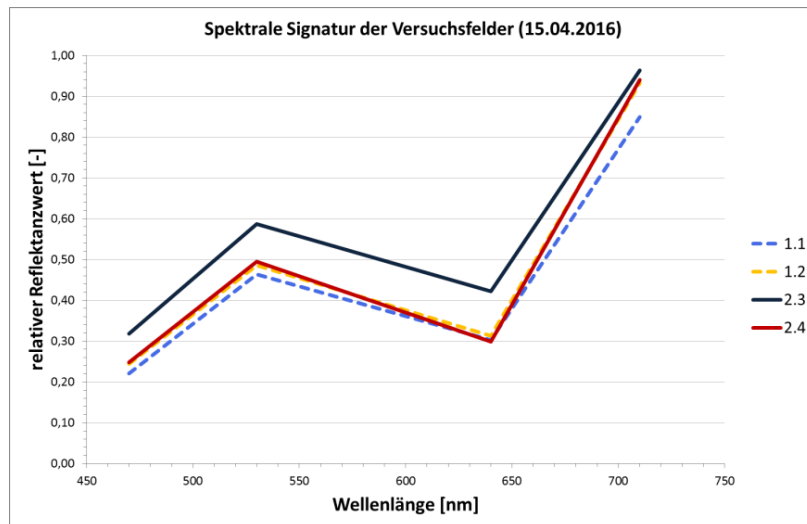


Abbildung 6: Spektrale Signaturen zu Beginn der Untersuchungen (1 - unbewässert, 2 - bewässert, blau - 'Kerubino', rot - 'Opal')

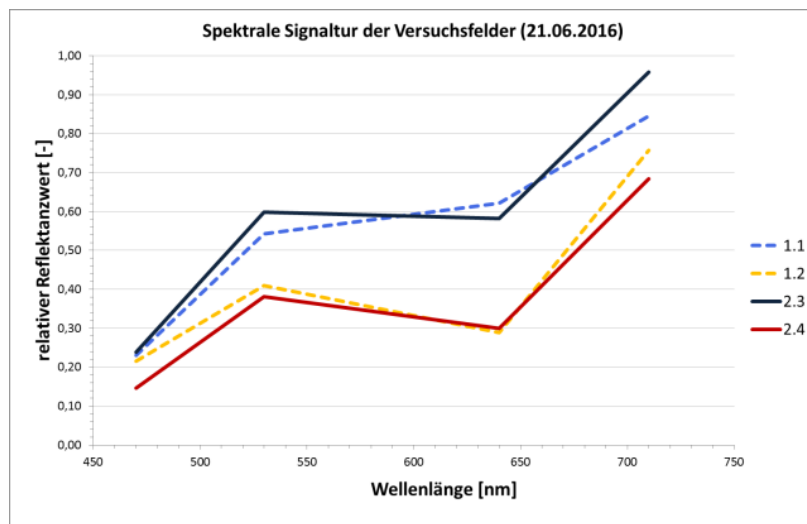


Abbildung 7: Spektrale Signaturen zu Ende der Untersuchungen (1 - unbewässert, 2 - bewässert, blau - 'Kerubino', rot - 'Opal')

Entwicklung des NDVI über den Versuchszeitraum

Zu Beginn der Messung weist der NDVI, gemittelt auf alle untersuchten Winterweizenfelder, einen Wert von etwa 0,47 auf (**Abbildung 8**). Für diesen Zeitpunkt befanden sich die Pflanzen in der phänologischen Stufe 30, was dem Beginn des Streckens der Haupttriebe entspricht.

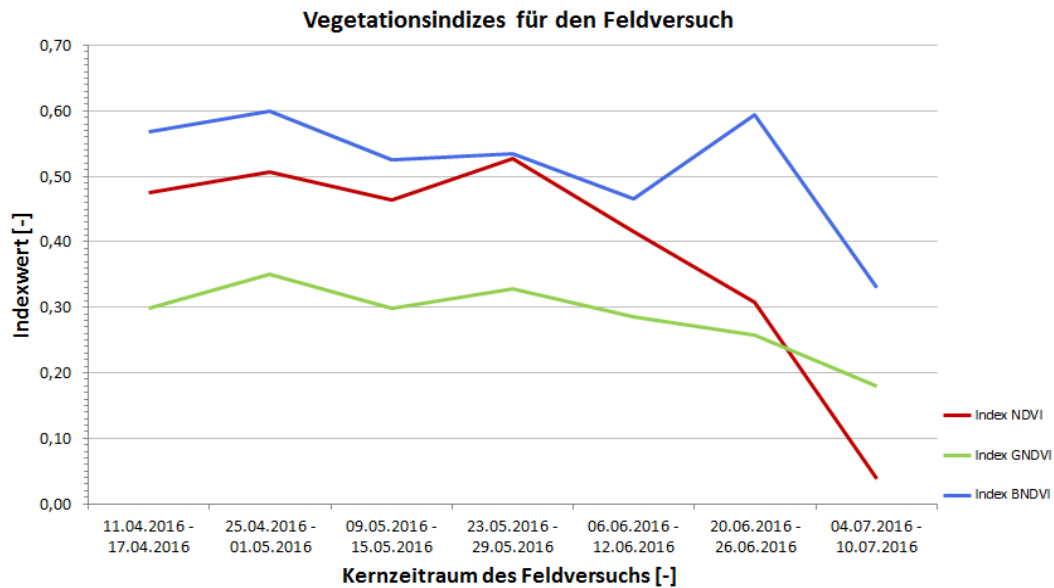


Abbildung 8: Verlauf der berechneten Indizes im Versuchszeitraum für alle untersuchten Weizenpflanzen

Für diese ersten vier Termine (7 Wochen) ist eine positive Tendenz der Indizes zu verzeichnen. Eine Zunahme des NDVI spricht auch für eine steigende Vitalität der Pflanzen und kann mit einer erhöhten Produktivität in Zusammenhang gebracht werden. Mit den nächsten vier Wochen nehmen die ermittelten Werte des Vegetationsindizes NDVI jeweils um etwa 0,11 ab.

Da sich der NDVI aus der Differenz zwischen den Reflexionswerten im roten visuellen Licht und im Nahen Infrarot ergibt, kann von einem Zusammenhang mit dem Chlorophyllgehalt der Laubblätter ausgegangen werden.

Für eine Beurteilung der erhobenen NDVI-Werte wurde der relative Chlorophyllgehalt der Laubblätter durch eine Messung der SPAD-Werte ermittelt. In einem Korrelationsdiagramm lassen sich die tatsächlichen Beziehungen zwischen den Ergebnissen beider Messungen grafisch verdeutlichen (**Abbildung 9**).

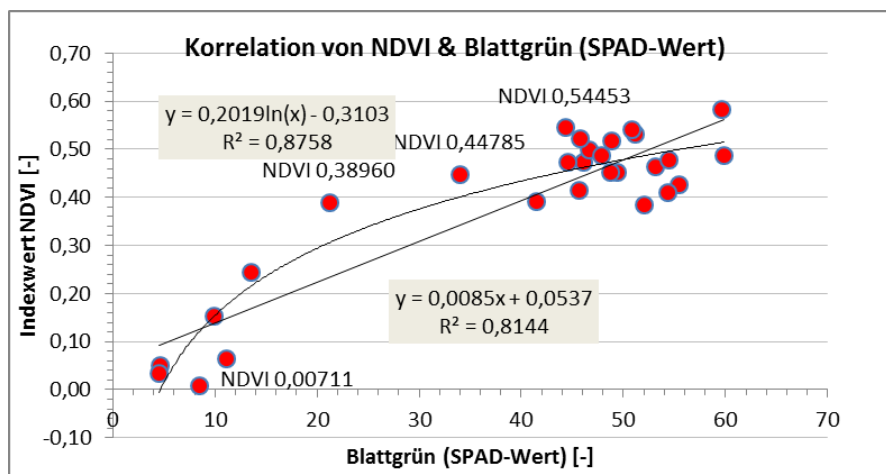


Abbildung 9: Korrelation des Blattgrüns (SPAD-Wert [-]) und der ermittelten NDVI-Werte [-]

Es ließ sich eine lineare Regression mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,8144$ sowie eine logarithmische Regressionskurve mit $R^2 = 0,8758$ nachweisen. Dass mit der logarithmischen Funktion eine leicht bessere Annäherung an die Korrelation zwischen den Blattgrünwerten und dem Index beschrieben werden kann, wurde bereits von SERRANO und Kollegen (2000) in einer Studie über den Zusammenhang zwischen dem NDVI und dem LAI (leaf area index) angedeutet und stützt damit weitestgehend die Ergebnisse dieser Untersuchung.

Generell kann aus den hohen Werten der Bestimmtheitsmaße R^2 geschlossen werden, dass die ermittelten NDVI-Werte eine gute Aussagekraft über das Blattgrün bzw. die relativen Chlorophyllwerte im Winterweizenblatt besitzen und sich darüber mit hoher Wahrscheinlichkeit Aussagen über die Pflanzenvitalität treffen lassen.

Entwicklung des GNDVI über den Versuchszeitraum

Verglichen mit dem NDVI sind die GNDVI-Werte bei den Weizenpflanzen etwas niedriger. Dies lässt sich mit der höheren Reflexion der Blattfarbstoffe im grünen Spektrum des visuellen Lichts begründen. Die Werte des GNDVI entwickelten sich in den ersten Wochen analog zu den NDVI-Werten (**Abbildung 8**). Während der NDVI jedoch gegen Ende der Messungen einen drastischen negativen Verlauf nimmt, zeichnet sich bei dem GNDVI nur geringfügig eine solche Tendenz ab. Zu vergleichbaren Ergebnissen waren auch LEBOURGEOIS *et al.* (2012) bei einem ähnlichen Feldversuch mit Zuckerrohr (*Saccharum officinarum L.*) gekommen. Anhand der gefundenen linearen Korrelation mit den Blattgrünwerten ($R^2 = 0,8823$) sollte davon ausgegangen werden, dass der GNDVI eine besonders gute Aussagefähigkeit für Weizenpflanzen zum Zeitpunkt ihrer höchsten Produktivität besitzt.

Entwicklung des BNDVI über den Versuchszeitraum

Gemittelt über alle untersuchten Felder nimmt der BNDVI am ersten Messzeitpunkt (April 2016) einen Wert von etwa 0,57 ein. Zum zweiten Termin, 14 Tage später, entwickelt sich der Index analog zu den bereits diskutierten Werten des NDVI und GNDVI, mit leicht positiver Tendenz (**Abbildung 8**). Im Anschluss kommt es zu einem Absinken des Indexwertes. Besonders markant für die Kurve des BNDVI ist ein erneutes Maximum am 21.06.2016, während diese für den NDVI und GNDVI absinkt. Dass dieser Index nicht mehr äquivalent zu den Anderen verläuft, zeigt auch der deutliche Unterschied in der gefundenen Korrelation mit den Blattgrünwerten (SPAD). Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt bei 0,5508 und damit deutlich unter den anderen Regressionen. Anhand der Werte für den BNDVI kann davon ausgegangen werden, dass sich die Absorption im blauen Licht bei anhaltender Trockenheit oder anderen Stressfaktoren nicht proportional zu der Absorption im roten Licht entwickelt. Somit kommt es zwangsläufig zu einem Divergieren der Indexwerte für den NDVI und BNDVI während eines Trockenstresses der Pflanz-

zen. Der Vegetationsindex BNDVI hat sich somit als wenig brauchbar für die Beschreibung der Vitalitätszustände von Winterweizen in höheren phänologischen Stadien erwiesen.

3.2 Unterschiede in den Bewässerungsstrategien

Einen weiteren Fokus dieser Analyse­methode stellt die Detektion von Wachstumsunterschieden innerhalb der untersuchten Weizenfelder aufgrund von differenzierter Bewässerung dar. Da bereits festgestellt werden konnte, dass der NDVI ein gutes Maß für die Pflanzenvitalität darstellt, wird im weiteren Verlauf dieser Index zur Bewertung verwendet.

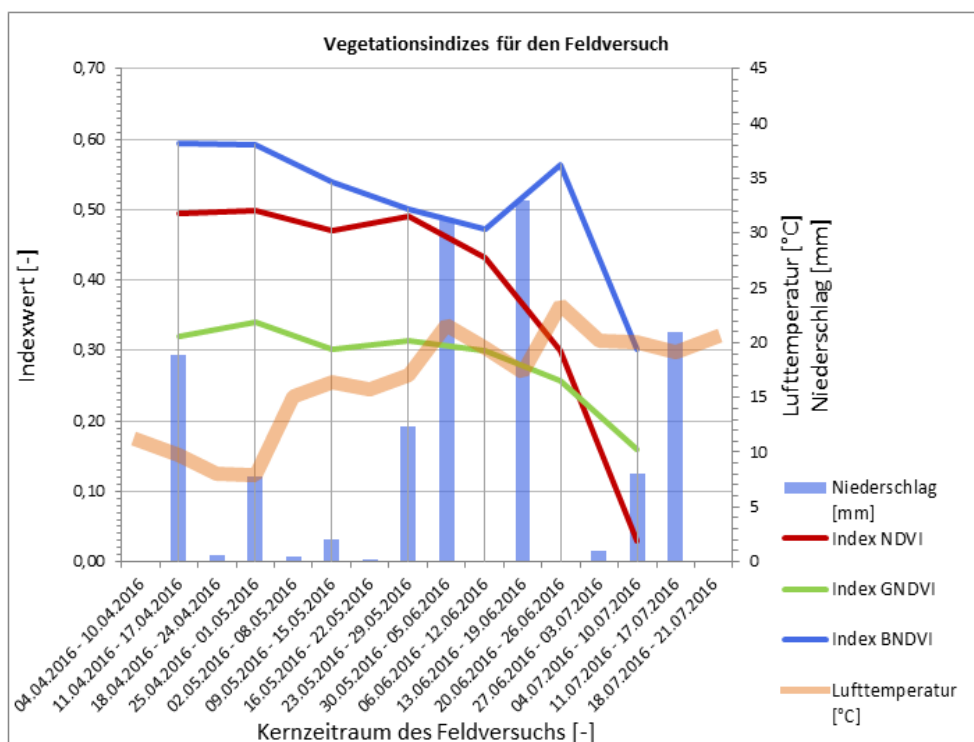


Abbildung 10: Vegetationsindizes aller Weizenpflanzen unter Niederschlagswasser

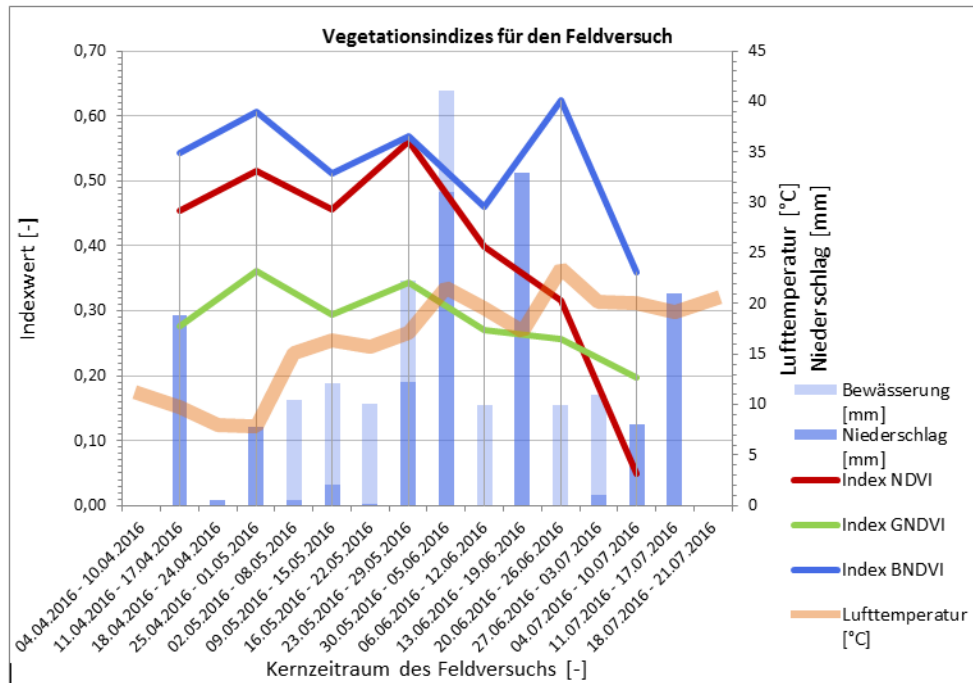


Abbildung 11: Vegetationsindizes aller Weizenpflanzen mit zusätzlicher Bewässerung

Abbildung 10 und **11** stellen die Vegetationsindizes im Zusammenhang mit der Wasserverfügbarkeit durch Niederschlag und mit bzw. ohne zusätzliche Bewässerung dar. Die Indizes der bewässerten und unbewässerten Felder weisen nur geringe Unterschiede auf. Die Messwerte lassen keine definitiven Aussagen über den Einfluss der Wasserversorgung auf die Entwicklung der Winterweizenbestände zu. Nur für den vierten Messzeitpunkt (24.05.2016) kann ein stärkerer Anstieg des NDVI für die bewässerten Felder ausgemacht werden. Es lässt sich vermuten, dass die stetige Wasserversorgung durch zusätzliche Beregnung der Felder einen leicht positiven Effekt auf die Entwicklung des Blattfarbstoffs Chlorophyll hat. Die vorangegangenen Wochen hatte es nur 2,2 mm geregnet, die bewässerten Felder bekamen zu dieser Zeit zusätzlich 20 mm aus den Beregnungsanlagen. Die ermittelten Kurvenverläufe lassen den Schluss zu, dass Unterschiede, hervorgerufen durch ein zusätzliches Bewässerungssystem, nicht durch die Entwicklung des NDVI über den Untersuchungszeitraum abgebildet werden können. Dieses Ergebnis kann mit der vorherrschenden Wetterlage während der Vegetationsperiode im Jahr 2016 begründet werden.

Für den Monate April und Mai ist die Niederschlagssumme 2016 fast doppelt so hoch wie der entsprechende Zeitraum im „Dürre“-Jahr 2015 gewesen. Hieraus kann geschlossen werden, dass es eine relativ stabile Versorgung der Pflanze mit ausreichenden Wassermengen im Untersuchungszeitraum gegeben haben muss.

3.3 Sortenunterschiede

Die angewandte Methode sollte zudem auf die Möglichkeit hin ausgewertet werden, Sorten anhand spektraler Merkmale voneinander zu differenzieren. Bei der Betrachtung der Sortenunterschiede wurden die Bewässerungsvarianten nicht beachtet. Für die Bewertung sind die Indexwerte für alle Felder einer Weizensorte, unabhängig von der Bewässerungsmethode, zusammengefasst worden. In **Abbildung 12** und **13** sind die Kurven der ermittelten Vegetationsindizes zu erkennen. Im Hintergrund sind jeweils die mittleren Tagestemperaturen sowie die Niederschlagssummen dargestellt.

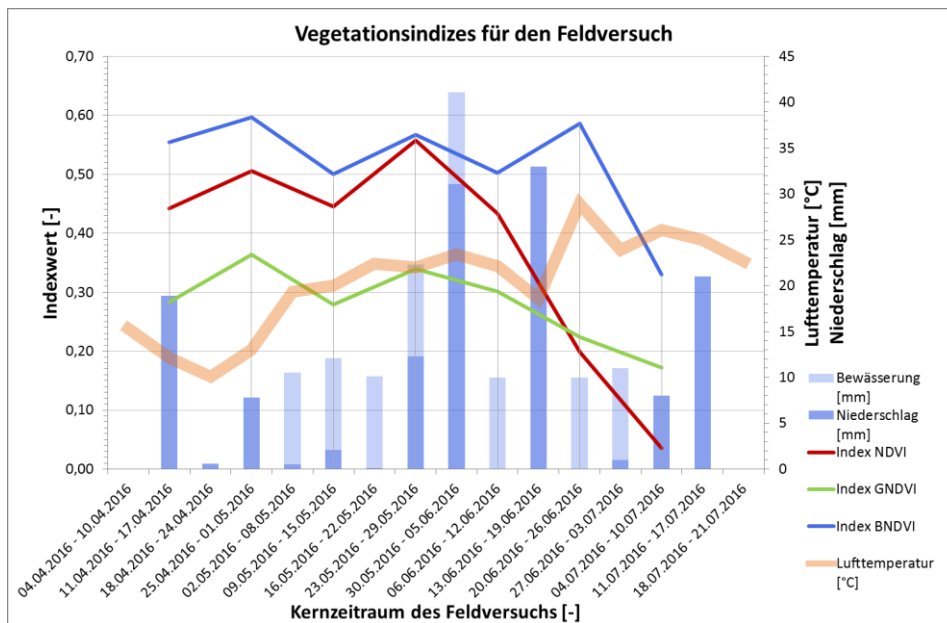


Abbildung 12: Vegetationsindizes der Weizenpflanzen Kerubino über den Beobachtungszeitraum

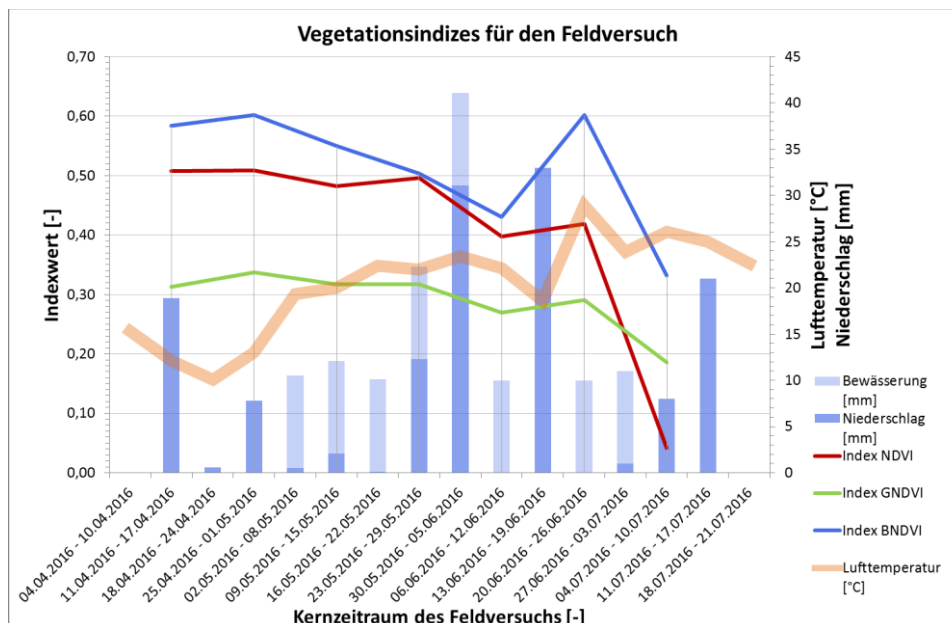


Abbildung 13: Vegetationsindizes der Weizenpflanzen 'Opal' über den Beobachtungszeitraum

Die dargestellten Kurven in **Abbildung 12** und **13** unterscheiden sich erheblich voneinander. Für die Sorte 'Opal' zeigt sich ein relativ stabiler NDVI über den gesamten Wachstumszeitraum. Für die Sorte 'Kerubino' kann eine relativ unstete Entwicklung der Indexwerte festgestellt werden. Für sie zeichnet sich damit ein früherer Rückgang in den NDVI-Werten ab. Durch die erektophile Blattstellung und auch aufgrund der, nach Literaturangaben stark ausgeprägten Trockenstressresistenz, wäre zu erwarten gewesen, dass diese Kulturpflanze von einer Stresssituation weniger stark beeinträchtigt wird. Tatsächlich ist es in diesen Untersuchungen aber die Sorte 'Opal', für die die Indexwerte über zwei Wochen länger stabil bleiben. Allerdings wird in der Literatur für die Sorte 'Kerubino' auf die kurze Kulturzeit und schnelle Reife verwiesen (I.G. Pflanzenzucht GmbH 2013). So kann davon ausgegangen werden, dass der Rückgang des NDVI in den 'Kerubino'-Feldern nicht auf Trockenstress zurückzuführen ist, sondern als Resultat einer abgeschlossenen phänologischen Entwicklung zu deuten sein sollte.

4 Fazit und Ausblick

4.1 Fazit

Es kann für die angewandte Methode der Verschneidung der Spektraldaten beider Kameras festgestellt werden, dass über die nachträgliche Datenbearbeitung und die Berechnung des NDVI valide Aussagen über die Vitalität des angebauten Winterweizens getroffen werden können. Dies bedarf allerdings erheblicher zeitlicher Investitionen. Beide alternativen Indizes (GNDVI, BNDVI) waren für die Detektion von trockenstressinduzierten Entwicklungs- und Vitalitätsunterschieden in den Pflanzen nur gering oder nicht aussagekräftig.

Entwicklungsunterschiede in den Pflanzen bedingt durch eine Bewässerung konnten nur bedingt nachgewiesen werden. Ursache waren die vergleichsweise hohen Niederschlagssummen, die deutliche Unterschiede in der Verfügbarkeit von Wasser nicht erkennen ließen.

Sortendifferenzen in der phänologischen Entwicklung konnten durch die angewandte Methode allerdings gut erkannt werden. Hinsichtlich der kultivierten Winterweizensorten 'Kerubino' und 'Opal' unterschieden sich die ermittelten Indexwerte deutlich. Die NDVI-Werte für 'Kerubino' nahmen bereits ab Ende Mai ab. Dies stellt wahrscheinlich keine Stresssymptomatik dar, sondern ist Folge der kurzen Kulturzeit dieser Weizensorte. In den Untersuchungsergebnissen der Sorte 'Kerubino' wurde nicht klar, ob die Pflanzen aufgrund von Trockenheit die Seneszenz verfrüht eingeleitet hatten, oder ob sie den Reifeprozess komplett durchlaufen konnten und somit auf natürliche Weise den Rückbau des Pflanzenpigments Chlorophyll eingeleitet haben. Da gerade die Sortenunterschiede durch Züchtung bei Weizenkulturen so gravierend sind, fällt es schwer, mit Bestimmtheit eine Aussage über die Ursachen zu treffen.

Generell spricht die gute Wasserversorgung über den Kulturzeitraum dafür, dass die Pflanzen wahrscheinlich keinem oder höchstens mäßigem Trockenstress ausgesetzt

waren. Die zur Verfügung gestellten Wetter- und Bewässerungsdaten gaben zwar Informationen zur potentiellen Wasserverfügbarkeit, allerdings können erst unter Einbeziehung von Zustandsgrößen des Bodens Aussagen zum tatsächlich vorhandenen pflanzenverfügbaren Wasser getroffen werden.

4.2 Ausblick

Die Erkenntnisse der durchgeführten Versuchsreihe erweitern das Verständnis der Anwendung optischer Systeme in einer präzisen Landwirtschaft. Die angewandte Methode bietet Möglichkeiten, die gewonnenen Informationen über die Vitalität der angebauten Winterweizenpflanzen zu nutzen, um Nährstoff- oder Wassermangel nachzuweisen. Zudem bietet die Nutzung von handelsüblichen Digitalkameras als multispektrales Analysewerkzeug die finanziellen Möglichkeiten, für eine auf einfache Fernerkundungsdaten basierende, nachhaltige Landwirtschaft. Die Messwerte einiger Aufnahmen deuten zudem an, dass sich die verwendete „Programmautomatik“ nicht ausreichend an den hellsten Punkten in der Aufnahme orientiert hat. Die Übersättigung einiger Pixel in der Aufnahme beeinflusst somit die Messungen und Errechnung der Vegetationsindizes.

Zukünftig wird es noch wichtiger sein, Bodendaten in die fernerkundungsbasierte Analyse von Kulturpflanzen mit einzubeziehen. Über die Erkenntnis, wie viel Wasser der Pflanze im Wurzelraum tatsächlich zur Verfügung steht, können wichtige Informationen abgeleitet werden. Es besteht die Schwierigkeit, Informationen zum Teil nur durch intensive Aufarbeitung der Rohdaten zu extrahieren. Die Methode ist noch nicht vollständig ausgereift und es bedarf weiterer Forschung auf dem Gebiet, um Wissenslücken zu schließen.

Des Weiteren bietet es sich an, einen Vegetationsindex in Vergleich zur Aussagekraft der Methode zu inkludieren, der sich zum Teil direkt aus meteorologischen Daten generieren lässt. SEMERÁDOVÁ und Kollegen (2013) wandten zu diesem Zweck den Vegetation Drought Response Index (VegDRI) an. In weiteren Studien könnte dieser Index angewandt werden.

Im Sinne eines gut handhabbaren Analysetools wäre auch die Erforschung der automatischen Erkennung homologer Blätter in dem RGB- und NGB-Bild vorteilhaft. Hierzu schlagen OELZE *et al.* (2016) vor, die Kalibrierung der zwei verwendeten Digitalkameras über ein Schachbrettmuster vorzunehmen. Derartige Entwicklungstendenzen würden eine Automatisierung der Vegetationsanalyse begünstigen und zu einer schnelleren Übertragung der gewonnenen Informationen über bestimmte Pflanzenparameter führen. Um die Effektivität eines kalibrierten Systems noch zu steigern, wären Aufnahmen aus größerer Höhe vorteilhaft. Die Auflösung der beiden verwendeten Digitalkameras würde ausreichen, um die Aufnahmen von einer Drohne (UAV) aus vorzunehmen. Dies könnte die Verzerrungen minimieren, die viel Aufarbeitung im Zuge der Datenprozessierung gebraucht haben.

In den Feldversuchen der Vegetationsperiode 2017 sollen die durch die Arbeit gewonnenen Informationen umgesetzt werden. Die spektrale Aufnahme der Weizenfelder wird dann mittels der Befliegung eines Hexacopters erfolgen.

Literaturverzeichnis

- BLUM A. (1996):** Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. In: *Plant Growth Regulation* 20 (2), S. 135–148.
- DANGWAL N., PATEL N.R., KUMARI M., SAHA S.K. (2015):** Monitoring of water stress in wheat using multispectral indices derived from Landsat-TM. In: *Geocarto International* 31 (6), S. 682–693. DOI: 10.1080/10106049.2015.1073369.
- FAROOQ M., WAHID A., KOBAYASHI N., FUJITA D., BASRA S. (2009):** Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. In: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Veronique, S., Alberola, C. (Hrsg.): *Sustainable Agriculture*, Dordrecht 2009, S. 153–188.
- FISCHER J. (2011):** Auswirkungen von Wasserstress auf den Entwicklungsverlauf und Ertrag in Winterweizen anhand der Bodenart und Sortencharakteristik". Bachelorarbeit. Hochschule Neubrandenburg.
- GEBBERS R., TAVAKOLI H., HERBST R. (2013):** Crop sensor readings in winter wheat as affected by nitrogen and water supply. In: Stafford, J. (Hrsg.): *Precision agriculture '13*, The Netherlands 2013, S. 79–86.
- GITELSON A., GRITZ Y., MERZLYAK M. (2003):** Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. In: *Journal of plant physiology* 160 (3), S. 271–282. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161704704034>, zuletzt geprüft am: 01.11.2016.
- GÖMANN H., FRÜHAUF C., LÜTTGER A., WEIGEL H.-J. (2017):** Landwirtschaft. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (Hrsg.): *Klimawandel in Deutschland*, Berlin, Heidelberg 2017.
- HEDLEY C., YULE I. (2011):** 11. Soil Water Status Maps for Variable Rate Irrigation. In: Pierce, F. & Clay, D. (Hrsg.): *GIS applications in agriculture: Volume Two: Nutrient Management for Energy Efficiency*, Boca Raton 2011, S. 173–189.
- HENIK J.J. (2012):** Utilizing NDVI and remote sensing data to identify spatial variability in plant stress as influenced by management. Graduate Theses and Dissertations Paper. Iowa State University, Ames, Iowa.
- I.G. PFLANZENZUCHT GMBH (HRSG.) (2013):** Kerubino Winterweizen E. URL: <http://www.lsg.lu/WW%20Kerubino%20-%20E.pdf>, zuletzt geprüft am: 05.11.2016.
- IPCC (2013):** Summary for Policymakers: Climate Change 2013. The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York 2013, S. 1–29.
- KURZ F. (2003):** Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Dissertation. Technische Universität München.
- LEBOURGEOIS V., BÉGUÉ A., LABBÉ S., HOULÉS M., MARTINÉ J. (2012):** A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. In: *Precision Agriculture* 13 (5), S. 525–541.
- OELZE M., SCHMIDSBERGER F., STOLZENBURG F. (2016):** Multikopter und Infrarottechnologie: 22. Workshop Computer-Bildanalyse und Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft, Wernigerode 2016.

- POTSDAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG (HRSG.) (2012):** Konferenz: Klimafolgen für Deutschland. Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft mbh, Berlin.
- SCHOPFER P., BRENNICKE A., MOHR H. (2010):** Pflanzenphysiologie. 7. Aufl. Elsevier, Spektrum Akad. Verl., München.
- SEMERÁDOVÁ D., HLAVINKA P., TRNKA M., LUKAS V., BOHOVIC R., TADESSE T., WARDLOW B., HAYES M., ŽALUD Z. (2013):** Remotely sensed NDVI as an indicator of drought stress on the vegetation. In: Siska, B., Nejedlík, P., Hájková, L., Kožnarová, V. (Hrsg.): Environmental changes and adaptation strategies: International Scientific Conference; conference proceedings ; abstracts ; 9th - 11th September 2013 ; Skalica, Slovakia, Nitra 2013.
- SERRANO L., FILELLA I., PENUELAS J. (2000):** Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. In: Crop Science 40 (3), S. 723. URL: http://www.creaf.uab.cat/global-ecology/Pdfs_UEG/Serrano2000CropSci.pdf, zuletzt geprüft am: 01.11.2016.
- STAFFORD J. (HRSG.) (2013):** Precision agriculture '13. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.
- SÜß A., DANNER M., LOCHERER M., HANK T., RICHTER K., OBSTER C. (2015):** Measuring Leaf Chlorophyll Content with the Konica Minolta SPAD-502Plus. EnMAP Fiel Guides Technical Report. URL: <http://doi.org/10.2312/enmap.2015.010>, zuletzt geprüft am: 23.09.2016.
- TAIZ L., ZEIGER E. (2007):** Plant physiology. Das Original mit Übersetzungshilfen. 4. Aufl. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg (Easy reading).

Herausforderungen der Feldphänotypisierung in der Rebenzüchtung

Field Phenotyping Challenges in Grapevine Breeding

Anna Kicherer¹, Katja Herzog¹, Lasse Klingbeil², Udo Seiffert³, Reinhard Töpfer¹

¹ *Julius Kühn-Institut, Federal Research Centre of Cultivated Plants, Institute for Grapevine Breeding Geilweilerhof, Siebeldingen.*

² *Institute of Geodesy and Geoinformation, Department of Photogrammetry, University of Bonn, Nußallee 15, 53115 Bonn.*

³ *Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation (IFF), Biosystems Engineering, Sandtorstr. 22, 39108 Magdeburg.*

E-Mail: anna.kicherer@julius-kuehn.de

Zusammenfassung: Die Rebenzüchtung im Allgemeinen und die Phänotypisierung im Speziellen sind sehr zeit- und arbeitsintensiv. Bisher basiert die Erhebung phänotypischer Daten hauptsächlich auf visuellen Schätzungen. Dieser Ansatz erfordert sehr viel Zeit, ist subjektiv und anfällig für menschliche Fehler. Die vermehrten Entwicklungen im Sensorbereich bieten eine wachsende Anzahl an Möglichkeiten, Pflanzeigenschaften auf eine nicht destruktive Weise zu erfassen. Gleichzeitig ermöglichen sie zuverlässige und objektive Messungen und bilden bei der Nutzung unterschiedlicher Sensoren die Basis für eine quantitative und qualitative Merkmalerfassung.

Der Bedarf und die Anforderungen an die Feldphänotypisierungsmethoden werden im Folgenden beschrieben. Desweiteren werden zwei Prototypen zur Feldphänotypisierung mit Einsatzziel Rebenzüchtung vorgestellt: Der PHENObot und der Phenoliner.

Die Pipeline des PHENObot besteht aus mehreren Komponenten: (1) Datenaufnahme mit Hilfe eines automatisch fahrenden Kettenfahrzeugs mit Kamerasystem, (2) Datenmanagement basierend auf einer Bilddatenbank, (3) Datenauswertung mit verschiedenen automatischen Programmen.

Basierend auf den Erkenntnissen bei der Entwicklung des PHENObot wurde eine Multi-sensorplattform, der Phenoliner, aufgebaut. Als Basis wurde ein ERO SF200 Traubenvollernter verwendet. Der durch Rückbau einen fahrbaren Tunnel darstellt, welcher die unabhängig von den variierenden Lichtbedingungen im Freiland einsetzbar ist. Auf dem Phenoliner wurden verschiedene Sensorsysteme aufgebaut: zum einen (1) ein Multi-kamerasystem (RGB, NIR) das die gesamte Laubwandhöhe abdeckt und zum anderen (2) ein hyperspektrales Kamerasystem, sowie (3) ein RTK GPS und ein Neigungssensor für die Georeferenzierung der Sensordaten.

Deskriptoren: Phänotypisierungsplattform, sensorgestützte Phänotypisierung, Multi-kamerasystem, Hyperspektrale Bildgebung

Abstract: *Grapevine breeding in general and phenotyping in particular is very time-consuming and labor-intensive. So far, phenotyping is mainly done by visual estimations. This approach is time consuming, subjective and prone to human errors. With the recent development of sensor techniques, a new field of applications emerged providing non-destructive measurements of plant characteristics. Simultaneous, reliable and objective measurements are possible by using different sensors and provide the basis of a quantitative and qualitative trait determination.*

Needs and requirements of phenotypic methods in grapevine breeding and the challenges we are facing in field phenotyping will be shown. Furthermore we will present two prototype approaches of field phenotyping platforms setup for the application in grapevine breeding named PHENObot and Phenoliner, respectively.

The PHENObot pipeline consists of several components: (1) data collection, using an automatically GPS tracked vehicle with a camera system, (2) data management established based on an image database, (3) data analysis with various automatically running programs. It can be used to screen vines on a single vine level for genetic analysis or selection of breeding material.

The multi-sensor platform named Phenoliner was developed based on the experience gathered in the PHENObot approach. As a vehicle an emptied grape harvester is used as a movable tunnel to be more independent from varying field light conditions. Different sensors are installed on the platform: (1) a vertical and horizontal multi-camera-system for full grapevine height coverage (RGB and NIR), comparable to the one on the PHENObot, (2) a hyperspectral camera system and (3) a RTK-GPS and inertial sensor for image geotagging.

Keywords: *phenotyping platform, sensor based phenotyping, Multi-camera-system, Hyperspectral imaging*

1 Einleitung

Die Rebenzüchtung und vor allem die in diesem Zusammenhang stehende Phänotypisierung sind sehr zeitaufwendig. Derzeit basiert die Beschreibung von phänotypischen Merkmalen meist auf visuellen Schätzungen (BBCH Skala, OIV Merkmale). Diese Herangehensweise benötigt eine Menge Zeit und Personal und liefert oft subjektive Ergebnisse. Zudem ist eine Beurteilung der phänotypischen Merkmale in der Rebenzüchtung für die meisten Merkmale und Fragenstellungen direkt im Feld durchzuführen. Erweitert man die Methode hingegen um eine automatische und quantitative Erhebung von präzisen phänotypischen Daten kann dies zu einer Effizienzsteigerung in der Rebenzüchtung beitragen. Ziel ist es also, eine automatisierte Datenerhebung direkt im Feld zu

realisieren. Dafür sollen feldgängige robuste Phänotypisierungsplattformen eingesetzt werden, um im Hochdurchsatz phänotypische Merkmale erfassen zu können. Die Georeferenzierung der erhobenen Sensordaten spielt in der Rebenzüchtung eine besondere Rolle, da es sich bei den betrachteten Pflanzen oft um Einzelpflanzen bzw. einzelne Genotypen handelt, die es zu unterscheiden gilt. Die Einzelstockzuordnung von Ergebnissen der Sensordatenauswertung ist daher essentiell. Ziel der sensorgestützten Selektion in der Rebenzüchtung ist die objektive, präzise und schnelle Erfassung von Merkmalen direkt im Weinberg.

Es existieren einige hoch standardisierte Phänotypisierungsanlagen für verschiedene Kulturpflanzen, die meist im Labor oder Gewächshaus untergebracht sind (GRANIER *et al.* 2006, VAN DER HEIJDEN *et al.* 2012, NAGEL *et al.* 2012). Vorteil dieser Anlagen ist der hohe Grad an standardisierten Bedingungen der realisiert werden kann. Da wir uns bei der Merkmalerfassung von Weinreben allerdings hauptsächlich auf das Freiland konzentrieren, treten bei der Freilandphänotypisierung direkt im Weinberg hingegen einige spezielle Herausforderungen auf. Generell gibt es zwei Möglichkeiten wie Phänotypisierung im Weinbau stattfindet, zum einen aus der Luft mittels Satelliten (LAMB 2000, MAZZETTO *et al.* 2010), Flugzeugen (LOSOS *et al.* 2013) oder Drohnen (LILIENTHAL 2017) was meist im Precision Farming Anwendung findet oder vom Boden aus, vertikal zur Laubwand, was derzeit die Methode der Wahl in der Rebenzüchtung ist. Bei der Datenerhebung vom Boden bzw. von einer geeigneten Plattform aus kommt es auf Grund des betrachtenden Objektes und der Umgebungsbedingung zu verschiedenen Problemstellungen (KICHERER *et al.* 2015). Ist das betrachtete Ziel die Traubenzone, hat man oft Schwierigkeiten mit der Verdeckung der Objekte durch andere Trauben und Blätter. Speziell in frühen Entwicklungsstadien ist der sich gleichende Hintergrund eine große Herausforderung in der Bildauswertung. Hier reichen allein 2D Informationen nicht aus um den Hintergrund von dem Objekt im Vordergrund zu unterscheiden. Eine weitere Schwierigkeit in der Bildauswertung kann die Variabilität des Merkmals wie beispielsweise die Unterschiede in Trauben- und Beerenform, -größe und -farbe sein. Das größte Hindernis stellt aber die schwankende Qualität und Quantität des vorhandenen Lichtes dar, was eine standardisierte Datenaufnahme erheblich beeinträchtigt.

Im Folgenden sollen zwei Feldphänotypisierungsplattformen und ihre Anwendungsbeispiele vorgestellt werden.

2 Material und Methoden

Vorgestellt werden zwei Feldphänotypisierungsplattformen: PHENObot und Phenoliner (**Abbildung 1**). Beim PHENObot handelt es sich um einen im interdisziplinären Team (Projekt PHENOVines) entwickelten Roboter. Basis ist ein GPS gesteuertes, elektrisch betriebenes Kettenfahrzeug (NeoSat, Windegger, Südtirol), welches ursprünglich aus dem Apfelanbau kommt. Es wurde ergänzt um ein Multikamerasystem (3 x monochrom, 1 x RGB, 1 x NIR) mit entsprechender Beleuchtungseinheit, eine Kameralagerung und

entsprechendem Rechner zur Steuerung und Datenablage (KICHERER *et al.* 2015). Eine standardisierte Datenerhebung kann nur bei Dämmerung/Nacht garantiert werden.



Abbildung 1: Links PHENObot, rechts Phenoliner.

Auf den Erfahrungen beim der Konstruktion des PHENObots aufbauend wurde gemeinsam mit verschiedenen Partnern eine dem Konzept eines fahrbaren Tunnels folgende Phänotypisierungsplattform, der Phenoliner aufgebaut. Als Grundlage dient ein Traubenvollernter. Im Inneren der Maschine wurde, durch Rückbau der für die Traubenernte notwendigen Teile, Platz für Sensoren geschaffen. Neben einem RTK GPS System befinden sich zwei Sensorsysteme mit entsprechender künstlicher Beleuchtung auf dem Fahrzeug. Zum einen ein Multikamerasystem (4 x RGB, 1 x NIR) vergleichbar mit dem des PHENObots sowie ein hyperspektrales Kamerasystem (400-2500nm) bestehend aus zwei Kameras. Das Datenmanagement erfolgt in beiden Fällen über die Datenbanken PLA (Pflanzen Lage Administration) in der alle Georeferenzen der Einzelstöcke hinterlegt sind und über IMAGEdata welche eine Ablage von phänotypischen Daten ermöglicht.

3 Ergebnisse (oder Methodenentwicklung)

Die mit den beiden Plattformen aufgenommen Bilder lassen sich im Anschluss an die automatisierte und geo-referenzierte Datenaufnahme mit verschiedenen Auswertetools auswerten. Derzeit werden alle auf dem PHENObot entwickelten Tools auf dem Phenoliner implementiert. Hierbei spielen Ertragsparameter eine zentrale Rolle.

RGB Bilder der Traubenzone können genutzt werden um aus ihnen die für die Rebenzüchtung wichtigen Merkmale Beerengröße und – farbe zu extrahieren. Dazu wird das auf Matlab basierende Tool BIVcolor (Berries in Vineyards) verwendet (ROSCHE *et al.*

2014, KICHERER *et al.* 2015). Ein weiteres Merkmal, das im Zusammenhang mit dem Ertrag steht, ist die Balance zwischen vegetativem und generativem Wachstum. Bestimmen lässt sie sich durch das Verhältnis des Ertrages zum Gewicht des Winterschnittholzes. In der Rebenzüchtung kann es als Merkmal zur Beurteilung von Sämlingen im Zuchtgang genutzt werden. Eine Bestimmung des Schnittholzesgewichtes ist sehr zeit- und arbeitsaufwendig. Es besteht die Möglichkeit für die nicht destruktive Messung des Schnittholzesgewichtes einen Stereobildansatz zu nutzen. Hier werden zwei monochrome bzw. in Graustufen konvertierte RGB-Bilder zur Tiefenkarten verrechnet und automatisch das Schnittholz segmentiert (KICHERER *et al.* 2017).

Vergleicht man den Informationsgewinn aus 2D Bildern so ist der erzielte Genauigkeitsgrad bei 3D Daten höher einzuschätzen, da Verdeckungen durch unterschiedliche Kamerablickwinkel minimiert werden. Aus den, mit den Plattformen aufgenommen, Bildern lassen sich 3D Punktwolken der gesamten Laubwand errechnen, aus welcher dann durch automatische Segmentierung und Klassifizierung, Ertragsparameter extrahiert werden können (ROSE *et al.* 2016). Diese dienen als Basis für die Ertragschätzung.

Die mit dem Phenoliner erfassten hyperspektralen Daten sollen für die Modellierung von Auswerteroutinen im Hinblick auf abiotischen und biotischen Stress genutzt werden.

4 Diskussion

Der Phenoliner bietet gegenüber dem PHENObot verschiedene Vorteile. Die Hintergrundproblematik in frühen Entwicklungsstadien (Ähnlichkeit von Hintergrundbildanteilen in jahrzeitlich frühen Stadien der Laubwandentwicklung) kann beim Einsatz des Phenoliners vernachlässigt werden, da er wie eine Art „fahrender Tunnel“ durch die Rebzeilen fährt und die „Fahrzeugwand“ als Hintergrund ständig die Durchsicht begrenzt. Die Sensorsysteme des Phenoliners können über die Maschine selbst mit Strom versorgt werden, was batteriespeisende zusätzliche Stromaggregate überflüssig macht. Eine Datenaufnahme ist in der Fahrt möglich und es können zur selben Zeit mehrerer Sensoren genutzt und somit Daten im höheren Durchsatz im Vergleich zum PHENObot erhoben werden. War mit dem PHENObot eine standardisierte Datenaufnahme nur in der Dämmerung/Nacht möglich, ist dies mit dem Phenoliner unabhängig von schwankenden Lichtbedingungen zu jeder Tageszeit möglich, was den mit Abstand größten Vorteil dieser Plattform ausmacht.

Beide Systeme sind Forschungsprototypen und können genutzt werden, um in der Rebenzüchtung genetische Ressourcen oder Zuchtmaterial anhand der vorgestellten Merkmale zu beurteilen. Der Phenoliner ist aufgrund der Bauart (Traubenvollernter) außerordentlich robust und als exzellent hinsichtlich der Feldtauglichkeit zu bewerten. Anwendungen im Weinbaumanagement sind im Hinblick auf Ertragschätzung und zu treffende Managemententscheidungen in der Praxis in Zukunft denkbar. Merkmalspezifische, kostengünstige Sensoren können auf dem Phenoliner schnell und praxisnah ge-

testet werden. Die erhobenen Datensätze sind eine hervorragende Basis für die Entwicklung weiterer Merkmalsauswerterroutinen.

Danksagung

Arbeiten zur Entwicklung des PHENObot wurden dankenswerterweise durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF über PtJ Jülich) mit den Projekten Phenovines (FKZ0315968) und CROP.SENSE gefördert (FKZ0315534). Der Phenoliner wurde im Rahmen der Vorhaben VitiSmart (FKZ2815ERA05C) und BigGrape (FKZ2815702515) durch das Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung (BMEL über Pt BLE) sowie im Vorhaben novisys (FKZ031A349) durch das BMBF (über PtJ Jülich) und dem Engagement der Firma ERO-Gerätebau GmbH(Niederkumbd, Deutschland) aufgebaut.

Literaturverzeichnis

- GRANIER C., AGUIRREZABAL L., CHENU K., COOKSON S.J., DAUZAT M., HAMARD P., THIOUX J.J., ROLLAND G., BOUCHIER-COMBAUD S., LEBAUDY A., MULLER B., SIMONNEAU T., TARDIEU F. (2006):** PHENOPSIS, an automated platform for reproducible phenotyping of plant responses to soil water deficit in *Arabidopsis thaliana* permitted the identification of an accession with low sensitivity to soil water deficit. *New Phytol* 169 (3):623-635. doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01609.x
- KICHERER A., HERZOG K., PFLANZ M., WIELAND M., RÜGER P., KECKE S., KUHLMANN H., TÖPFER R. (2015):** An automated phenotyping pipeline for application in grapevine research. *Sensors* 15 (3):4823-4836
- KICHERER A., KLODT M., SHARIFZADEH S., CREMERS D., TÖPFER R., HERZOG K. (2017):** Automatic image-based determination of pruning mass as a determinant for yield potential in grapevine management and breeding. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 23 (1):120-124
- LAMB D.W. (2000):** The use of qualitative airborne multispectral imaging for managing agricultural crops - a case study in south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 40 (5):725-738. doi:http://dx.doi.org/10.1071/EA99086
- LILIENTHAL (2017):** Digitaler Weinbau. <http://digitaler-weinbau.de/>. Accessed 08 March 2017
- LOSOS J., ARNOLD S., BEJERANO G., BRODIE E.I., HIBBETT D. (2013):** Evolutionary Biology for the 21st Century. *PLoS Biol* 11(1):e1001466. doi:doi:10.1371/journal.pbio.1001466
- MAZZETTO F., CALCANTE A., MENA A., VERCESI A. (2010):** Integration of optical and analogue sensors for monitoring canopy health and vigour in precision viticulture. *Precision Agriculture* 11 (6):636-649. doi:10.1007/s11119-010-9186-1
- NAGEL K.A., PUTZ A., GILMER F., HEINZ K., FISCHBACH A., PFEIFER J., FAGET M., BLOSSFELD S., ERNST M., DIMAKI C., KASTENHOLZ B., KLEINERT A.-K., GALINSKI A., SCHARR H., FIORANI F., SCHURR U. (2012):** GROWSCREEN-Rhizo is a novel phenotyping robot enabling simultaneous measurements of root and shoot growth for plants grown in soil-filled rhizotrons. *Funct Plant Biol* 39 (11):891-904. doi:http://dx.doi.org/10.1071/FP12023
- ROSCHER R., HERZOG K., KUNKEL A., KICHERER A., TÖPFER R., FÖRSTNER W. (2014):** Automated image analysis framework for high-throughput determination of grapevine berry sizes using

conditional random fields. *Comput Electron Agric* 100 (0):148-158.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.008>

ROSE J., KICHERER A., WIELAND M., KLINGBEIL L., TÖPFER R., KUHLMANN H. (2016): Towards Automated Large-Scale 3D Phenotyping of Vineyards under Field Conditions. *Sensors* 16 (12):2136

VAN DER HEIJDEN G., SONG Y., HORGAN G., POLDER G., DIELEMAN A., BINK M., PALLOIX A., VAN EEUWIJK F., GLASBEY C. (2012): SPICY: towards automated phenotyping of large pepper plants in the greenhouse. *Funct Plant Biol* 39 (11):870-877.
doi:<http://dx.doi.org/10.1071/FP12019>

Digitale Geländemodelle als Grundlage von UAV-Tiefflügen mit konstanter Höhe über Grund und als Ergebnis von Flächenbefliegungen

Digital terrain models as the basis of low altitude UAV flights with a constant altitude above ground and as a result of area surveying flights

Ludwig Schrenk, Mirko Bothe, Sergej Krukouski

CiS GmbH, Hansestraße 21, 18182 Bentwisch

E-Mail: lschrenk@cis-rostock.de

Zusammenfassung: Unsere UAV-Flugplanungssoftware lässt die Flughöheneinstellung „Meter über Grund“ zu, wenn ein Geländemodell vorhanden ist. Dabei werden zwei aufeinanderfolgende Wegpunkte durch eine gerade Strecke verbunden und wenn eine vorgebbare Differenz zwischen Strecke und Bodenmodell unter- oder überschritten wird, werden Zwischenpunkte eingefügt. Damit lassen sich auch stark kupierte Flächen in geringer Höhe von wenigen Metern automatisch befliegen

Digitale Geländemodelle sind von den Vermessungsämtern im Regelfall als sogenannte Geotiff Dateien zu beziehen. Es gibt unterschiedliche Rasterweiten (50 m bis 1 m) und damit Genauigkeitsstufen (10 m und 0,2 m) und danach richtet sich auch der Preis (10 bis 80 €/km² in MV). Mit unserer Software lassen sie sich aber auch aus topografischen Karten gewinnen.

Werden Flächen in größeren Höhen (50 - 300 m) befliegen und zur Bildauswertung auch noch Passpunkte benutzt, so lassen sich aktuelle Geländemodelle und auch Oberflächenmodelle mit hoher Genauigkeit herstellen. Die Geländemodelle enthalten bei uns neben den Höhen auch Neigung, Fließrichtung und anderes bis hin zu Erosionsbewertungen.

Die gewonnenen Geländemodelle, lassen sich zur Optimierung von Düngung und Pflanzenschutz z.B. an Gewässerrändern oder im Obst- und Weinbau, insbesondere aber zur Einhaltung der Umweltschutzforderungen einsetzen - aber eben auch für Tiefflüge zur Gewinnung sehr detaillierter Aufnahmen.

Deskriptoren: UAV, UAS, Drohne, NDVI, DGM, Oberflächenmodell, Tiefflug, Erosion

Abstract: *Our UAV flight planning software allows to set flight height to “meters above ground”, if a digital terrain model is available. In that case two consecutive waypoints are connected by a direct line and additional waypoints are created if the difference between this line and the terrain model exceeds or falls below a set threshold.*

Digital terrain model can normally be acquired from land surveying offices as so called Geotiff files. There are variable grid widths (50 m to 1 m) and accuracies (10 m and 0.2 m) and the price is adjusted accordingly (in MV 10 to 80€/km²). With our software they can also be created from topographic maps.

If areas are surveyed during higher altitude flights (50-300 m) and if ground control points are use during image processing, current digital terrain and surface models with great accuracy can be created. In addition to height terrain models in our software also include information about slope, direction of flow and more up to evaluation of erosion.

The terrain models created in this way can be used to optimize applications of fertilizer or plant protection products e.g. at the edge of water bodies or in fruit or wine growing, or particularly for compliance with environmental protection rules but also for planning low altitude flights in order to capture very detailed images. The poster will present and demonstrate these processes with images.

Keywords: UAV, UAS, drone, DTM, surface model, low altitude flight, erosion

1 Einleitung

Mit Autopiloten ausgestattete Multicopter gestatten dem Landwirt oder seinem Dienstleister im Regelfall Feldstücke in konstanter Höhe über NN zu befliegen. Dabei wird die Höhe mit GPS und barometrisch geregelt. Ist aber das Gelände stark kupert, und will man detailreiche hochaufgelöste Bilder erhalten, so ist diese Methode weitgehend ungeeignet. Abhilfe schaffen entweder die Integration von Abstandssensoren oder die Steuerung nach einem Oberflächen- oder Geländemodell (**Abbildung 1**). Wir demonstrieren hier letzteren Weg, arbeiten aber trotzdem daran, weitere Sensoren in die Höhenregelung einzubeziehen.

2 Material und Methoden

Das ADAM-Geländemodell

Das Agrarmanagementsystem ADAM ist in den letzten 20 Jahren als Grafik- und Sachdatenorientiertes Datenhaltungs- und Verarbeitungssystem für den Precision Farming-Einsatz in Feldbaubetrieben entwickelt worden. Die Entwicklung erfolgte im ständigen Kontakt mit Anwendern, Ämtern und Hochschulen. Es umfasst eine Schlagkartei und sehr hilfreiche und effektive GIS-Funktionen sowie spezielle landwirtschaftliche Funktionalitäten von der Anbauplanung bis zur Düngungsgabenberechnung und teilflächen-spezifischem Pflanzenschutz. In der Datenstruktur werden alle relevanten Daten der Feldstücke, so auch Geländedaten, getrennt nach allgemeinen und Jahresdaten gehalten.

Die Geländedaten befinden sich als sogenannte Objektvariable an den Elementen eines Rasters. Dessen Zellen aus Oberflächenpunkten oder per Import von anderen Sys-

temen z.B. im GeoTiff-Format mit Daten gefüllt wird (**Abbildung 2**). An jeder Zelle befinden sich neben den Höheninformationen auch Informationen zur Neigung, zur Anzahl der Zellen, die in sie entwässern und mehr.

Erzeugen durch digitalisieren

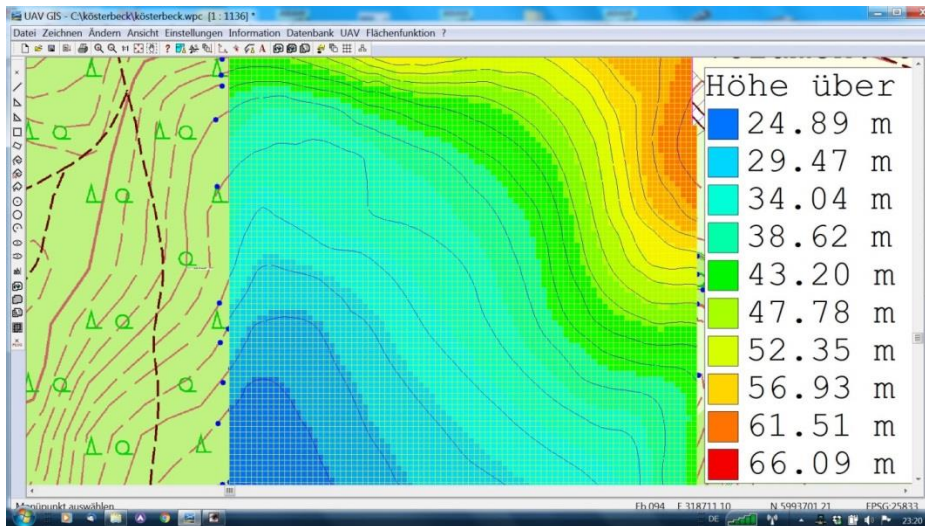


Abbildung 1: Geländemodell aus TK 10 durch Digitalisieren erzeugt

Import vom Amt

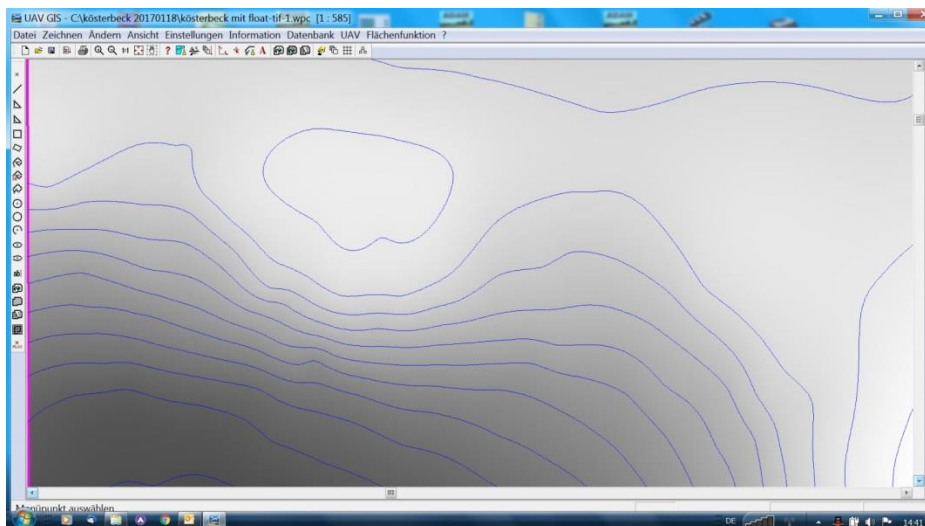


Abbildung 2: als DGM Format GEO-Tiff

ATKIS® umfasst gegenwärtig die Komponenten:

- Digitale Landschaftsmodelle (DLM)
- Digitale Geländemodelle (DGM)
- Digitale Topographische Karten (DTK)
- Digitale Orthophotos (DOP)

Digitale Geländemodelle beschreiben die Geländeoberfläche als die Grenzfläche zwischen dem festen Erdkörper und dem Wasser einerseits und der Luft andererseits. Neben regelmäßig verteilten Höhenpunkten (DGM-Gitter) können DGM Strukturelemente in Form von Geländelinien und besonderen Geländepunkten enthalten. DGM stellen im Gegensatz zu Digitalen Oberflächenmodellen keine Objekte auf der Erdoberfläche dar (z.B. Bäume oder Häuser). Die Modellierung der DGM erfolgt nach bundeseinheitlichen Festlegungen dokumentiert im ATKIS®-Objektartenkatalog (ATKIS®-OK-DGM). Für die DGM-Nutzung liegt ein AdV-Produktstandard für Digitale Geländemodelle vor. Objektartenkatalog und Produktstandard stehen für jedermann auf der Homepage der AdV zur Verfügung.

Produktangebot in MV:

Bezeichnung	DGM 50	DGM25	DGM10	DGM5	DGM 2	DGM 1
Gitterweite	50 m	25 m	10 m	5 m	2 m	1 m
Genauigkeit	2,5-10 m	1,25-5 m	0,5-2 m	0,25-1 m	0,15-0,4 m	0,15-0,2 m
Preis je km ²	frei		10 €	20 €	50 €	80 €
Verfügbarkeit	flächendeckend			teilweise		

Aktualität

Logischerweise sind digitalisierten Punkte nicht aktueller als die Karten, von denen digitalisiert wird. Die DGM-Daten sind nicht aktueller als der entsprechende letzte Flug des Laserscanners. Aktuelle Daten bekommt man entweder durch das Einmessen von Punkten mittels RTK GPS (z.B. durch Mitfahren bei einer Bearbeitungsmaßnahme) oder photogrammetrisch durch einen UAV-Bildflug in größerer Höhe.

Will man das Oberflächenmodell selbst durch Bildflug erzeugen und soll es genau werden, so empfehlen wir das Einmessen von speziellen Markern (**Abbildung 3**), die von unserem System automatisch erkannt und für die genaue Georeferenzierung genutzt werden können.



Abbildung 3: Marker einmessen und Fläche befliegen

3 Ergebnisse (oder Methodenentwicklung)

Hat man ein Oberflächenmodell in hinreichender Genauigkeit, so kann man dieses für die Flugplanung zu Grunde legen und aus der Höhe über Grund die GPS-Höhe der Wegpunkte ermitteln. Da wir über alle relevanten Quellen selbst verfügen, konnten wir die notwendigen Änderungen vornehmen. Unser Flugplanungsprogramm bietet jetzt die Möglichkeit, auf einem im GeoTIFF bereitgestellten Geländemodell zu planen (**Abbildung 4**) und der Autopilot des Oktokopters bietet jetzt die Möglichkeit, die Höhendifferenz zwischen zwei Wegpunkten auf gerader Strecke zu überwinden, also auf dem Weg kontinuierlich zu steigen oder zu sinken.

In einem ersten Schritt entsteht jetzt eine Planung, die für die Endpunkte einer Wegstrecke die Höhen aus dem Modell nimmt und in einem zweiten Schritt werden solange Zwischenpunkte eingefügt, bis eine vorgegebene maximale Abweichung der Höhe über dem Modell an keiner Stelle mehr überschritten wird.

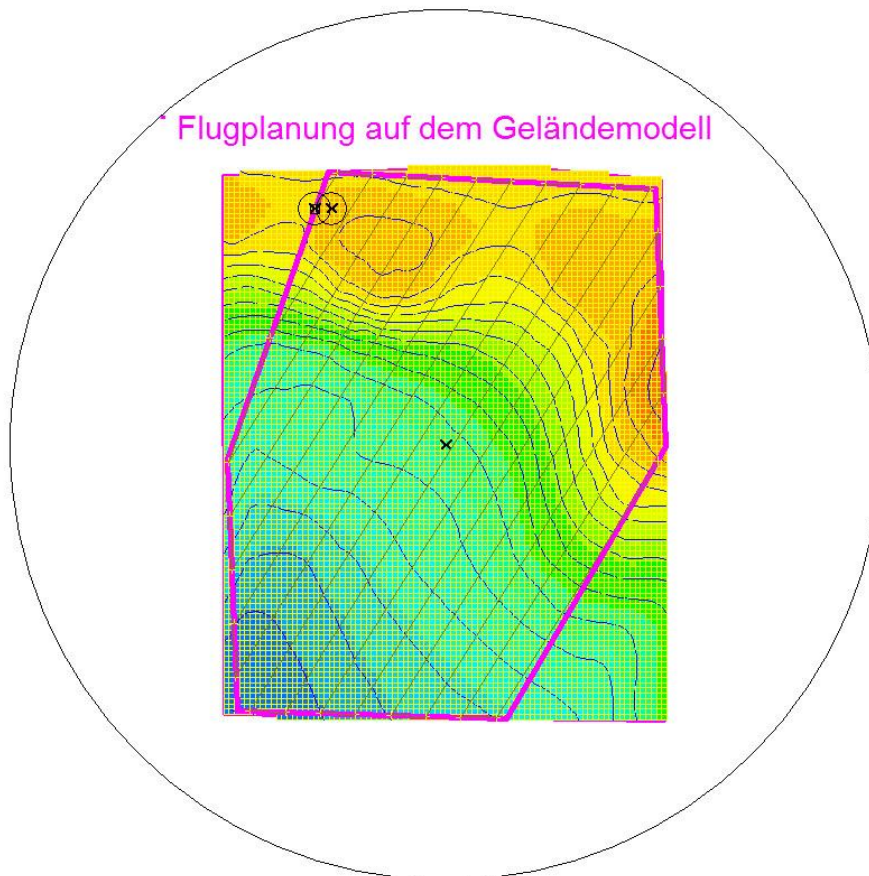


Abbildung 4: Flugplanung auf dem Oberflächenmodell

4 Nutzungsmöglichkeiten des Tieffluges

- Befliegen landwirtschaftlicher Flächen auf Gelände mit größeren Höhenunterschieden (**Abbildung 5**)
- Unkrauterkennung mit Tiefflugstichproben
- Schadensbewertung an Hand von Tiefflugstichproben
- Steigerung partieller Genauigkeit in größeren Modellen.

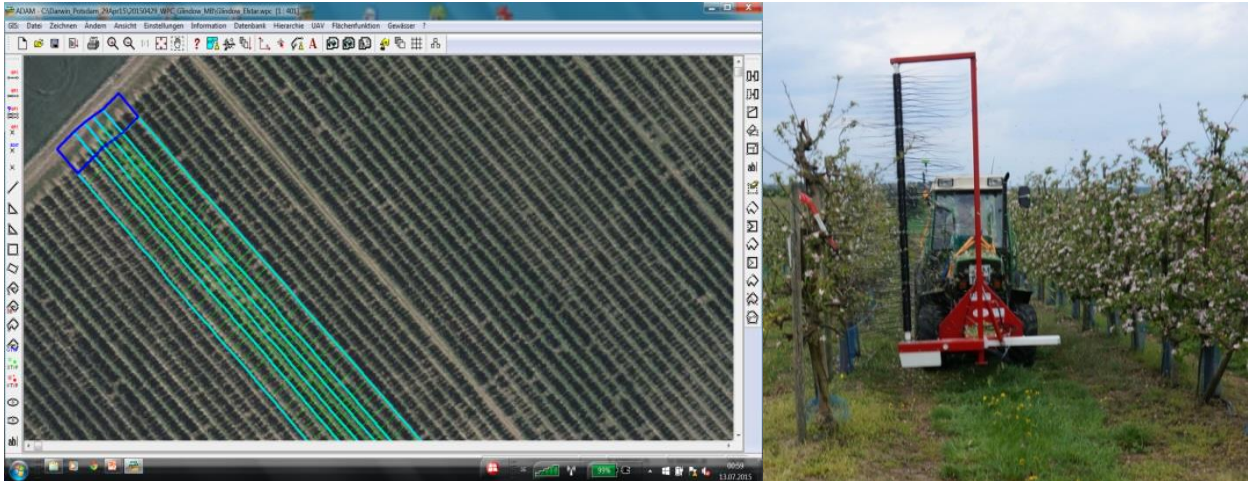


Abbildung 5: Initialisierung von Obstbaumbeständen für präzise Bearbeitung



Abbildung 6: Detailuntersuchung im Wald

Entwicklung eines prototypischen Bildanalyse-Workflows von entomologischen Gelbtafeln in ArcGIS mit Hilfe des ModelBuilders

Development of a prototypical image analysis workflow of entomological trapping cards in ArcGIS with the help of the ModelBuilder

David Ott¹, Timon Gottschlich², Torsten Prinz³

¹ Institut für Landschaftsökologie

² Institut für Geoinformatik

³ Institut für Geoinformatik, WWU Münster, Heisenbergstraße 2, 48149 Münster

E-Mail: david.ott@uni-muenster.de, t_gott04@uni-muenster.de, prinz@uni-muenster.de

Zusammenfassung: Die Einsatzbereiche von automatisierten Auswertesystemen reichen von der Medizin, über die Biologie bis hin zur Landwirtschaft. Diese Systeme können beispielsweise in der Landwirtschaft zur Artenbestimmung von Schädlingen dienen und so die Arbeit von professionellen Entomologen erheblich erleichtern. Teilweise erreichen solche Systeme sogar genauere Klassifikationsergebnisse als manuelle Auswerteverfahren.

Hierbei beschränken sich die Systeme jedoch zumeist auf die Analyse der Insekten unter Laborbedingungen, zum Teil mit Hilfe von Mikroskopen. Oft werden dabei die im Gelände, insbesondere in der Landwirtschaft zur Schädlingsbekämpfung eingesetzten, sog. *Gelbtafeln* außer Acht gelassen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurde deshalb ein prototypischer, auf dem *Modelbuilder* von *ArcGIS* basierender Bildanalyseablauf für Insektenassoziationen auf Gelbtafeln entwickelt, welcher breite Anknüpfungspunkte für eine quantitative Schädlingsbetrachtung bietet. Das entwickelte Modell ermöglicht es, hochauflösende Bilder von Gelbtafeln durch automatisierte Klassifikationsprozesse speziesrelevant auszuwerten. Um die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit des Arbeitsablaufs zu testen, wurden verschiedene Experimente durchgeführt und ausgewertet. Darüber hinaus werden Anknüpfungspunkte und Integrationsmöglichkeiten des Verfahrens in Bezug auf landwirtschaftliche Anwendungen aufgezeigt. Somit ist ein Grundstein für die GIS-gestützte Modellierung von Schadinsekt-Vorkommen gelegt und eine weiterführende Prognostik ihrer möglichen Ausbreitungsdynamik denkbar.

Deskriptoren: Schädlingsbekämpfung, Klebefallen, Gelbtafeln, Bildanalyse, ArcGIS Modelbuilder, automatisierte Klassifizierung

Abstract: *The range of use of automatic analysis systems reaches from medicine over biology to agriculture. These systems can serve in agriculture e.g. to identify pests and therefore help professional entomologists significantly. To some extent, those systems can reach higher classification rates than manual analyses. The systems mostly focused on the analysis of insects under laboratory conditions, partly with microscopes, neglecting the yellow cards (i.e., sticky traps) usually used in agriculture for pest control.*

Hence in this work we present a prototypic, geoinformational image analysis workflow is developed in a common GIS. The model developed with the tools of the ArcGIS Model-Builder enables to analyze fully automatic high-resolution pictures of insects on the yellow cards. We conducted different kinds of experiments to evaluate the efficiency and accuracy of the workflow of the automatic image analysis process. Furthermore, we point to future possibilities of the method in the sense of a more integrated analysis process in the context of an application in agriculture. This study builds a cornerstone for GIS-based modelling of the occurrence of insect pests and subsequent prediction of potential outbreak dynamics.

Keywords: *Pest management, sticky traps, yellow cards, image analysis, ArcGIS ModelBuilder, automated classification*

Einleitung

Aufgrund der enorm steigenden Weltbevölkerung nimmt auch der Nahrungsbedarf deutlich zu. Daher ist die Landwirtschaft gezwungen den Ertrag zu steigern, um auch in Zukunft die Versorgung aller Menschen zu gewährleisten. Neben der Verbesserung der Anbautechnologien gehört die Schädlingsbekämpfung zu den wichtigsten Aufgaben der modernen Landwirtschaft, da schätzungsweise 28% der europäischen Produktionsverluste in der Landwirtschaft auf Schädlinge zurückzuführen sind (GOTSCH & BRAUNSCHWEIG 1999, OERKE *et al.* 1994). Im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes (IPS) spielt aus diesem Grund die Kartierung und Analyse der Vorkommen von Schädlingen eine besondere Rolle. Derartige Untersuchungen können Informationen über die ortsdifferenzierte Anzahl der Tiere auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche ab- und Maßnahmen zur Schädlingsbekämpfung einleiten. Hierbei kommen sogenannte Gelbtafeln - auch als Leimtafeln, Klebefallen, Fangtafeln oder Gelbfallen bezeichnet - zum Einsatz. Diese Standardmethode dient hauptsächlich zur frühzeitigen Erfassung der Intensität eines Befalls (sog. (Monitoring) durch Insekten (BÖCKMANN *et al.* 2015). Gelbtafeln sind in der Vegetation angebrachte, mit leimbestrichene Tafeln aus Kunststoff oder Pappe, an denen vor allem flugfähige Insekten dauerhaft kleben bleiben, wobei eine - nur teilweise spezifische - Lockwirkung der Tafeln durch den Farbton entsteht (HOMMES *et al.* 2003, YOUNG 2005). Daher finden sich auf den Fangtafeln vor Ort nicht nur der zu erfassende Schädling, sondern eine Vielzahl anderer Insekten. Somit ist das Auswerten der Tafeln sehr zeit- und arbeitsaufwändig, sowie fehleranfällig aufgrund der Herausforderung an die Identifikation der einzelnen Organismen.

Eine Automatisierung dieses Prozesses würde eine erhebliche Verbesserung darstellen. Dies erfordert die Entwicklung eines geoinformatischen Arbeitsablaufes möglichst durch ein in der Landwirtschaft häufig genutztes Geoinformationssystem (GIS) mit integrierter Bildanalyse. Gleichzeitig würde dies ein zeit- und ortsgenaueres regionales Monitoring über die Einzellokalität hinaus ermöglichen. In der Vergangenheit wurden bisher einige Systeme für maschinelles Sehen (Machine Vision System = MVS) entwickelt, die auch von Nicht-Experten genutzt werden können, aber über keine GIS-Integrationsmöglichkeiten verfügen (Übersicht in LIU *et al.* 2016, YANG *et al.* 2015).

Daher war das Ziel dieser Arbeit mit Hilfe des *ArcGIS ModelBuilder* einen Arbeitsablauf zu entwickeln, der sowohl eine hohe Genauigkeit, als auch die vielfältige Anwendbarkeit auf verschiedene Insektengruppen ermöglicht. Zusätzlich bietet das verwendete GIS eine in der Land- und Forstwirtschaft bekannte Arbeitsumgebung an. Ausgangspunkt und Datengrundlage stellte die Bildaufnahme von drei unterschiedlichen Insektentypen in einem unter Laborbedingungen durchgeführten Versuchsaufbau dar.

Material und Methoden

Der genutzte technische Aufbau dieser Arbeit besteht aus einer auf einem Stativ befestigten *Canon EOS 1200D* Kamera und einem *Canon Macro 100 mm* Objektiv. Der 18 Megapixel CMOS-Sensor ermöglichte hochauflösende Aufnahmen der Gelbtafeln, welche die Voraussetzung für eine sehr detaillierte Analyse der Fotos schaffen. Der verwendete *Scene Intelligent Auto Modus* der Kamera analysiert die Szene automatisch und wählt die passenden Einstellungen aus, so dass keine weiteren Änderungen nötig sind (www.canon.de 2017). Bei jeder senkrechten Aufnahme wird eine Entfernung von 76,5 cm zwischen Objektiv-Vorderkante und Gelbtafel eingehalten. Ein Blitz wird nicht verwendet, da es zu Lichtreflexionen kommt, die das spätere Analyseergebnis negativ beeinflussen.

Für die Studie wurden aufgrund unterschiedlicher Form, Farbe und Größe folgende Insekten als Versuchsobjekte verwendet: Schwarze Marienkäfer (*Chilocorus nigritus* (Fabricius, 1798), Schlupfwespen zusammengefasst als Kategorie aus den Arten *Aphidius ervi* (Haliday, 1834) und *Aphidius colemani* (Viereck, 1912), sowie Goldfliegen (*Lucilia caesar* (Linnaeus, 1758)). Die Insekten wurden im Rahmen des Versuches in unterschiedlichen Dichtestufen, jeweils die Arten einzeln und in verschiedenen Kombinationen, durch zufällige Streuung auf die Gelbtafeln aufgebracht (**Abbildung 1**). Insgesamt wurden 13 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten mit je drei Replikationen benutzt. Bei jeder Wiederholung wird ein neues, vom vorherigen unabhängiges, zufälliges Muster erzeugt. Die insgesamt 39 Gelbtafeln wurden aus gelbem Pappkarton auf 8x15 cm zugeschnitten, laminiert und mit Insektenleim (Tangle-Trap, Andermatt Biocontrol AG) bestrichen. **Abbildung 2a** zeigt ein Foto der Stufe 3 des Hauptexperimentes.

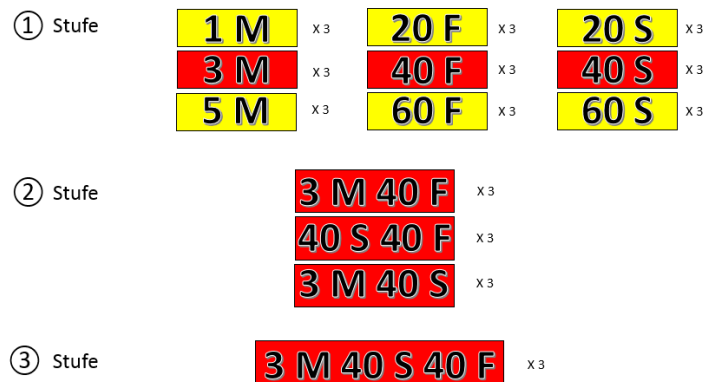


Abbildung 1: Versuchsplan: M = Marienkäfer, F = Fliege, S = Schlupfwespe; Zahlen = Anzahl der jeweiligen Insekten auf den Tafeln; Umkreiste Zahlen = jeweilige Experimentalstufe, Arten einzeln (Stufe 1), paarweise (Stufe 2) oder alle Arten zusammen (Stufe 3)

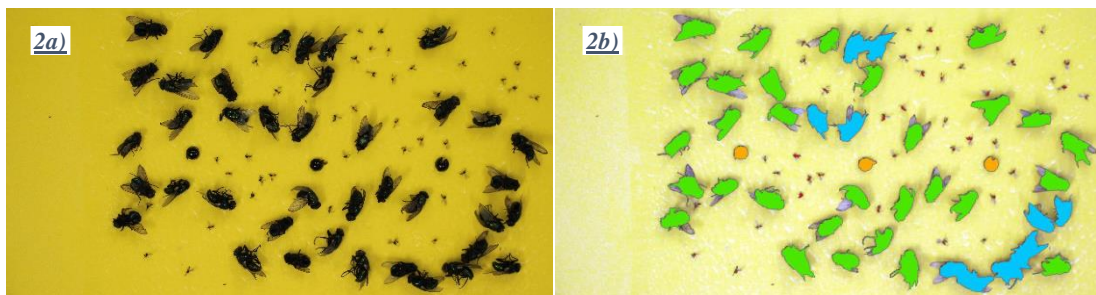


Abbildung 2: a) Stufe 3 des Hauptexperiments: 3 Marienkäfer, 40 Fliegen und 40 Schlupfwespen. b) Mit Modellansatz 6 klassifiziertes Bild: Grün = Fliegen; Blau = Zusammenhängende Fliegen; Orange = Marienkäfer; Rot = Schlupfwespen.

Bildanalyse mittels ModelBuilder

Der *ModelBuilder* ist ein Makro-Programmierungswerkzeug innerhalb von *ArcGIS*, welches die Erstellung von Geoverarbeitungsabläufen erlaubt (www.pro.arcgis.com 2017b). Mit ihm lassen sich räumliche Analysen und Datenverwaltungsprozesse modellieren und automatisieren, in dem mehrere Datensätze und Geoverarbeitungswerkzeuge hintereinander verkettet werden (www.pro.arcgis.com 2017b). Diese Verkettung wird als Modell abgespeichert und dargestellt. Mit dem *ModelBuilder* können somit komplexe Analyseschritte verknüpft und iterativ umgesetzt werden. Zur Klassifizierung der Insekten finden zusätzlich die Werkzeuge der Gruppe *Segmentierung* und *Klassifizierung* aus der *Spatial Analyst* Erweiterung Verwendung (Toolbox). Der Grundaufbau der verschiedenen Modellansätze ist vom Prinzip her gleich: Zuerst wird das Eingangsbild im angepassten *ModelBuilder* entweder direkt von einem Klassifikator untersucht, oder zuerst segmentiert und erst dann klassifiziert. Nach der Klassifikation werden die einzelnen Klassen (Rasterdaten!) in Polygone umgewandelt und entsprechend ihrer Attribute sortiert sowie gezählt. Im Verlauf der Arbeit konnte über eine Entwicklung und Kombination von fünf unterschiedlichen Modellansätzen ein finales Gesamtmodell (Modellansatz 6) konzipiert werden.

Ergebnisse (oder Methodenentwicklung) und geoinformatische Umsetzung

Das final erstellte Modell (Modelansatz 6) unterscheidet sich zu den Vorgängermodellen, in dem es zunächst aus dem segmentierten Raster mit Hilfe des ISO-Cluster-Klassifikators ein 2-Klassenbild erstellt. In diesem wird faktisch der Hintergrund vom Vordergrund unterschieden. Hierdurch geht zwar die Farbinformation der Pixel, die die Insekten darstellen, verloren, es lassen sich aber dennoch die Objekte anhand ihrer Form und Größe voneinander unterscheiden.

Vorgehensweise:

Zu allererst wird das zurechtgeschnittene Eingabebild mit den Parametereinstellungen 15,5 für *spectral detail* und 1 für *spatial detail* segmentiert. Im ISO-Klassifikator werden der Wert 2 als maximale Klassenanzahl und COLOR, MEAN, STD als *Segment Attributes* ausgewählt. Nach der Konvertierung des Rasters in Polygone sorgt das erste *Select*-Werkzeug für die Extraktion von minimalen Fehlklassifikationen mit dem Ausdruck: *Shape_Area > 90 AND Shape_Area < 1.000.000*. Das Werkzeug *Eliminate Polygon Part* eignet sich zur Entfernung von Lücken einer bestimmten Größe innerhalb von Polygonen (www.pro.arcgis.com 2017a). Mit dem Wert 1500 für *AREA* und der Auswahl *CONTAINED_ONLY* werden alle vollständig in einem Polygon enthaltenen Teile mit Flächeninhalt kleiner 1500 entfernt. Mit Hilfe der nächsten Arbeitsschritte sollen Polygone anhand ihrer unnatürlich langen Form aussortiert werden. Hierzu wird der Feature-Class Tabelle ein Feld *LangeObjekte* mit dem Typ *FLOAT* hinzugefügt. Mit dem Werkzeug *Calculate Field* wird im Folgenden die *Expression [Shape_Length] / [Shape_Area]* verwendet, um ein Ratio zu erstellen. Mit dem *Select*-Werkzeug lassen sich dann *LangeObjekte < 0.45* aussortieren. Daraufhin kombiniert das Werkzeug *Aggregate Polygons* mit dem Wert 10 als *Aggregation Distance* Polygone mit weniger als 10 Pixel Entfernung zu neuen Polygonen (www.desktop.arcgis.com 2017). Im nächsten Schritt müssen so viele Felder wie Insektentypen (drei) auf der Gelbtafel sind mit den Namen der verwendeten Insekten hinzugefügt werden. Darauffolgend wird dreimal das Werkzeug *Calculate Field* angewendet, um für jede der drei neu hinzugefügten Felder eine Abfrage zu generieren. Für das Feld Schlupfwespe werden mit der *Expression [Shape_Area] < 5000* alle Polygone mit einem Flächeninhalt kleiner 5000 Pixel hinzugefügt, für die Marienkäfer alle größer 5000 Pixel und kleiner 15.000 Pixel und für die Fliegen alle größer als 15.000 Pixel. Schlussendlich wird der erstellte Layer in drei Einzel-Layer aufgeteilt. Bei den Fliegen wurde zusätzlich noch eine Erweiterung eingeführt, die einen Extra-Layer für große Fliegen mit einem Flächeninhalt von über 40.000 Pixel erstellt. Diese Objekte sind mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit zwei oder mehr Fliegen die nah beieinanderliegen und daher als zusammenhängendes Objekt klassifiziert wurden. Diese Objekte müssen in der Nachbereitung der automatischen Klassifikation von Hand betrachtet und gezählt werden, um das Analyseergebnis weiter zu verbessern. **Abbildung 3** zeigt das finale Gesamtmodell im Entwurfsmodus des *ModelBuilders*. Das entsprechend klassifizierte Ausgabebild einer Gelbtafel ist in **Abbildung 2b** zu sehen.

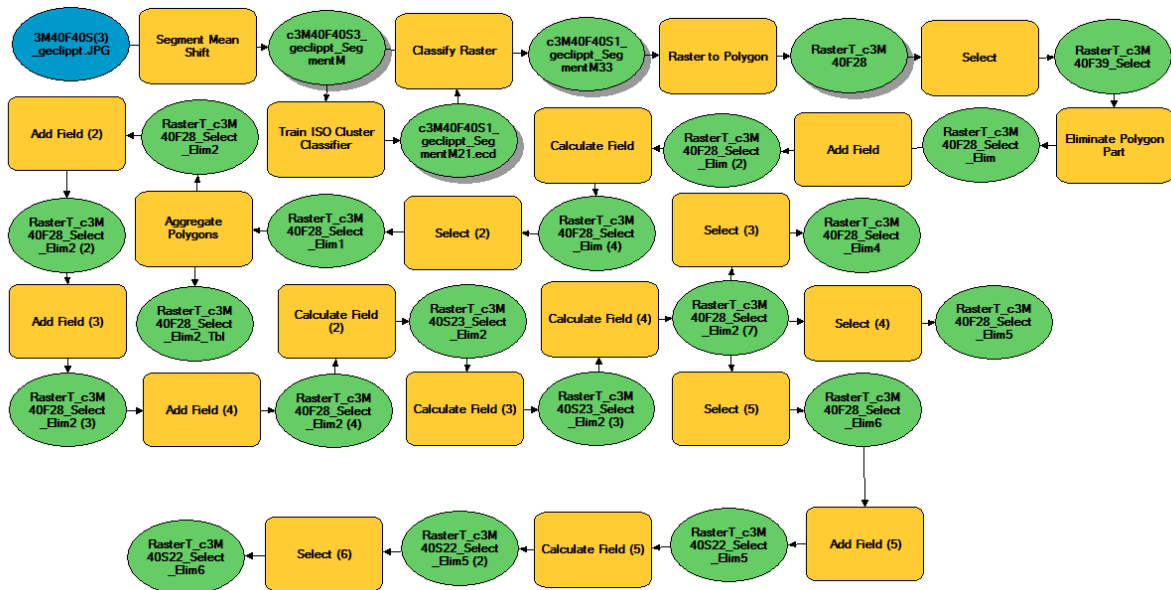


Abbildung 3: Finaler Modellansatz 6, ISO-Klassifikator (2 Klassen) mit vorheriger Segmentierung, anschließende Selektion anhand Form und Größe der Objekte in Rekombination der Modellansätze 1-5.

Diskussion

Es ist möglich mittels *ArcGIS* und dem darin enthaltenen *ModelBuilder* hochauflösende Bilder von entomologischen Gelbtafeln in einen prototypischen Bildanalyse-Arbeitsablauf zu integrieren und automatisiert zu klassifizieren. Bei der Betrachtung der speziellen Werkzeuge innerhalb der verschiedenen Modellansätze zeigt sich, dass überwachte Verfahren den unüberwachten Klassifikationen überlegen und in ihrer vorgenommenen Kombination zielführend sind. Für die Erstellung eines 2-Klassenbildes im Modellansatz 6 eignet sich der ISO-Klassifikator aufgrund des geringeren Zeitaufwandes am besten.

Es zeigt sich weiterhin, dass eine vorherige Segmentierung des Eingabebildes die Genauigkeit des Analyseergebnisses erheblich steigert, wobei insbesondere deutlich wird, dass die Faktoren Form und Dimension noch vor der Farbe der Objekte zur Differenzierung ebenjener maßgeblich sind. Die freie Kombinierbarkeit der Werkzeuge des *ArcGIS ModelBuilders* in Bezug auf die Automatisierung des Bildanalyseprozesses ist hierbei von besonderem Nutzen. Da der final entwickelte Modellansatz für weite Teile des Experiments sehr hohe Klassifikationsraten (nahe 100 %) aufwies, ist die Anwendung in modifizierter Form auch für weitere Insektentypen denkbar, indem die geometrischen Parameter angepasst und um weitere Optionen (z.B. Bildratios) erweitert werden.

Die vorgestellten Arbeitsschritte unterliegen speziellen Rahmenbedingungen (wie z.B. Aufnahmen im Labor und nicht in der Natur, keine definierte Metric usw.). So müssten in einem etwaigen Feldexperiment die Gelbtafeln z.B. georeferenziert werden, damit die ermittelten Insektenkonzentration über den gesamten Untersuchungsraum im GIS flächig interpoliert werden können. Dann wäre auch ein Einsatz einer Drohne (UAS), wel-

che mit einer höchstauflösenden Kamera ausgestattet ist denkbar. Zu bedenken sind darüber hinaus auch Störfaktoren, wie etwa Verwackelungen (Unschärfe) oder Fremdpartikel (Schmutz, Staub etc.) auf den Gelbtafeln – diese würden sicherlich z.T. als autonome Objekte klassifiziert werden. Gegebenenfalls wäre hier der Einsatz einer optimierten Version des *Select*-Werkzeugs im Hinblick auf Filterungsprozesse denkbar. Auch spielen die Belichtungsverhältnisse und Reflektionen eine große Rolle: Tageslicht neigt besonders an Stellen an denen der Leim inhomogen auf die Tafeln aufgetragen wurde zur diffusen Reflektion und damit zur Beeinträchtigung des Analyseergebnisses.

Wie die Ergebnisse der verschiedenen Modellansätze zeigen, erreichen die Modelle, welche die Farbe als *Segment Attribut* verwenden, nicht immer gute Ergebnisse, wohingegen der sechste Modellansatz, der vor allem die Größe und die Form verwendet, sehr gute Analyseergebnisse erzielt.

Im Hinblick auf zusammenhängende Objekte gibt es in *ArcGIS* keine direkt verfügbaren Werkzeuge, welche diese basierend auf nur Primär-Attributen voneinander zu trennen vermag. Somit lässt sich das Problem der zusammenhängenden Objekte nicht in Gänze lösen. Überlappungen von Objekten stellen jedoch nicht nur in der hier vorliegenden Arbeit Probleme dar, sondern beispielsweise wurden solche Überlappungen auch in der Arbeit von LIU *et al.* 2016 als eine Hürde angesehen, die schwer zu überwinden ist. Nichts desto trotz bietet *ArcGIS* eine Vielzahl an nützlichen Werkzeugen, die es ermöglichen, einen vollautomatischen Bildanalyse-Arbeitsablauf mit sehr guten Klassifikationsraten zu entwickeln.

Im Vergleich zu anderen Arbeiten zeigt sich, dass der in dieser Arbeit entwickelte Modellansatz 6 im Gegensatz zu anderen Systemen, wie z.B. ABIS (FRANCOY *et al.* 2008) oder DAISY (O'NEILL 2006), nicht auf eine limitierte Anzahl von Insekten bzw. auf bestimmte Körperteile beschränkt ist. Jedoch ist die Genauigkeit nur bei einer geringen Anzahl von Insekten auf den Tafeln hoch und wird bei zunehmender Anzahl sinken. So ist der vorgestellte Workflow innerhalb von *ArcGIS* stark abhängig von guten Rahmenbedingungen, insbesondere wenn an eine Adaption für naturnahe Bilddatensätze gedacht wird. Hier sehen wir wünschenswertes Entwicklungspotential innerhalb des *ModelBuilders*. Eine Weiterentwicklung zukünftiger Arbeiten sollte die Verbindung von lokal gewonnen Befallsdaten von Fangsystemen wie Gelbtafeln mit einer noch verbesserte Bildanalyse mit ggfs. einer Verknüpfung vorgeschalteter Bildaufbereitung und den hier vorgestellten Ansätzen des *ArcGIS ModelBuilders* berücksichtigen, um hieraus zum Beispiel GPS-gesteuerte Pestizideinsätze, welche genau auf das Schädlingsvorkommen an einem bestimmten Punkt abgestimmt sind, einzuleiten.

Dieser Kurzaufsatz basiert auf der Bachelorarbeit von Timon Gottschlich im Studiengang Geoinformatik des Institutes für Geoinformatik an der Westfälischen-Wilhelms-Universität Münster, verfasst im Januar 2017 mit gleichem Titel. Dort sind alle Modellansätze und Auswertungsschemas im Detail beschrieben.

Literaturverzeichnis

- BÖCKMANN E., HOMMES M., MEYHÖFER R. (2015):** „Yellow traps reloaded: what is the benefit for decision making in practice?“. In: *Journal of Pest Science*. 88 (2), S. 439–449, DOI: 10.1007/s10340-014-0601-7.
- FRANCOY T.M., WITTMANN D., DRAUSCHKE M., U. A. (2008):** „Identification of Africanized honey bees through wing morphometrics: two fast and efficient procedures“. In: *Apidologie*. 39 (5), S. 488–494, DOI: 10.1051/apido:2008028.
- GOTSCH N., BRAUNSCHWEIG T. (1999):** „Problem Identification and Knowledge Acquisition for the Solution of Pest Problems: A Suggestion for a Comprehensive Approach“. In: *Integrated Pest Management Reviews*. 4 (3), S. 181–191, DOI: 10.1023/A:1009681828304.
- HOMMES M., SIEKMANN G., PIEPENBROCK O., U. A. (2003):** *Reduzierung des Blattlausbefalls an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben*. (Bericht) Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn.
- LIU H., LEE S.-H., CHAHL J.S. (2016):** „A review of recent sensing technologies to detect invertebrates on crops“. In: *Precision Agriculture*., S. 1–32, DOI: 10.1007/s11119-016-9473-6.
- OERKE E.-C., WEBER A., DEHNE H.-W., U. A. (1994):** „Conclusions and perspectives“. In: *Crop Production and Crop Protection: Estimated Losses in Major Food and Cash Crops*. Edited by E.-C. Oerke, H.-W. Dehne, F. Schönbeck and A. Weber. Amsterdam: Elsevier, S. 742–70.
- O’NEILL M.A. (2006):** „DAISY: A Practical Tool for Semi-Automated Species Identification“. [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org/paper/DAISY-A-Practical-Tool-for-Semi-Automated-Species-O'Neill/243dcc1ce2d5248ea8e693c3da79c0f152ec52ee). Abgerufen am 21.03.2017 von /paper/DAISY-A-Practical-Tool-for-Semi-Automated-Species-O'Neill/243dcc1ce2d5248ea8e693c3da79c0f152ec52ee.
- WWW.CANON.DE, CANON (2017):** „Canon EOS 1200D - EOS DSLRs und kompakte Systemkameras“. Abgerufen am 21.03.2017 von http://www.canon.de/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_1200d/.
- WWW.DESKTOP.ARCGIS.COM, ARCGIS (2017):** „Polygone aggregieren—Hilfe | ArcGIS Desktop“. Abgerufen am 21.03.2017 von <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/cartography-toolbox/aggregate-polygons.htm>.
- WWW.PRO.ARCGIS.COM, ARCGIS (2017a):** „Polygon-Teil entfernen—Hilfe | ArcGIS for Desktop“. Abgerufen am 21.03.2017 von <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/eliminate-polygon-part.htm>.
- WWW.PRO.ARCGIS.COM, ARCGIS (2017b):** „Was ist ModelBuilder?—ArcGIS Pro | ArcGIS for Desktop“. Abgerufen am 21.03.2017 von <http://pro.arcgis.com/de/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>.
- YANG H.-P., MA C.-S., WEN H., U. A. (2015):** „A tool for developing an automatic insect identification system based on wing outlines“. In: *Scientific Reports*. 5, DOI: 10.1038/srep12786.
- YOUNG M. (2005):** „Insects In Flight“. In: *Insect Sampling in Forest Ecosystems*. Edited by Simon Leather. Oxford, UK: Wiley-Blackwell (Methods In Ecology), S. 129–131.

Nicht-invasive Detektion und Differenzierung von Pilzkrankungen im Weizen auf der Blattebene mittels Hyperspektralsensoren

Non-invasive detection and differentiation of fungal diseases of wheat on the leaf scale employing hyperspectral sensors

David Bohnenkamp, Jan Behmann, Anne-Katrin Mahlein

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz-Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Universität Bonn, Deutschland
E-Mail: davidb@uni-bonn.de

Zusammenfassung: Weizen als Kulturpflanze ist Wirt für verschiedene Pathogene und Schädlinge. Bestimmte pilzliche Schadorganismen befallen die Blätter der Pflanze und führen zu Blattkrankheiten, die den Ertrag signifikant reduzieren können. Die Bekämpfung von Blattkrankheiten gehört somit zu den essentiellen Maßnahmen im Weizenanbau, um den Ertrag und die Qualität des Erntegutes zu sichern. Eine weitere Optimierung von Pflanzenschutzmaßnahmen ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht erstrebenswert, erfordert jedoch eine frühzeitige Detektion und Identifikation der Schadsache.

Hyperspektralsensoren sind in der Lage auch früheste Auswirkungen einer Infektion zu erfassen und bieten somit Potentiale für eine Optimierung der Bestandsführung unter Krankheitsdruck. Hyperspektrale Kameras erfassen die Reflektanz der Blattoberfläche sowohl räumlich als auch spektral hochaufgelöst und detektieren durch den Pilz verursachte Veränderungen des Blattgewebes. Da pilzliche Schadorganismen jeweils spezifische Veränderungen des Blattgewebes verursachen und somit zu charakteristischen Veränderungen der Reflektanz führen, ist eine Detektion und Identifikation des jeweiligen Pathogens möglich.

Untersucht wurden die Blattkrankheiten Septoria-Blattdürre (Erreger: *Septoria tritici*), DTR-Blattdürre (Erreger: *Drechslera tritici-repentis*) und der Braunrost des Weizens (Erreger: *Puccinia triticina*) an verschiedenen Weizen (*Triticum aestivum*) Sorten. Zeitreihenmessungen erfassen die Symptomentwicklung in Hyperspektralbildern pro Tag während der Pathogenese und ermöglichen eine Analyse der spektralen Dynamik während des Übergangs von einem gesunden Blatt bis hin zur vollständigen Ausprägung spezifischer Symptome. Diese Datengrundlage ermöglichte die Definition verschiedener spektraler Infektionsstadien, die für unterschiedliche Wirt-Parasit-Interaktionen in der Pathogenese charakteristisch sind. Das entstehende Modell eines Krankheitsprozesses unterstützt den für Messungen im Bestand erforderlichen Skalenübergang und liefert

auf diese Weise wertvolle Vorinformationen für die sensorische Erfassung von Weizenkrankheiten im Feld.

Deskriptoren: Hyperspektrale Sensoren, Reflektanz, Blattkrankheiten, Infektionsstadien

Abstract: *Wheat as a crop plant is host to several pathogens and pests. Certain fungal organisms infect the plant leaves and lead to foliar plant diseases, which can significantly decrease wheat yield. The management of foliar diseases plays an important role in the cropping system. Optimization of plant protection techniques lead to economic and ecological benefits, but require an accurate detection and identification of plant diseases at early time-points.*

Hyperspectral sensors are able to detect even first effects of an infection and offer potentials for an optimized crop management under plant disease pressure. Hyperspectral image data contain information about the reflectance of a leaf surface with a high spatial and spectral resolution. Through characteristic changes of the leaf surface - caused by a certain fungal pathogen - it is possible to detect and identify these pathogens.

Investigations were done with Septoria tritici blotch (pathogen: Septoria tritici), Tan spot (pathogen: Drechslera tritici-repentis) and Leaf rust (pathogen: Puccinia triticina) on different cultivars of wheat (Triticum aestivum). To obtain disease development and spectral information of pathogen-specific symptoms over time in hyperspectral images, time series were held by measuring infected plants every day during pathogenesis.

This data base enables a definition of characteristic spectral signatures throughout the infection stages of pathogenesis. The emerging model that is based on information assessed on the leaf scale, will be translated to investigations on the canopy scale for a sensor-based detection of wheat foliar diseases in the field.

Keywords: *Hyperspectral sensors, reflectance, foliar diseases, infection stages*

1 Einleitung

Pflanzenschutzmittelapplikationen werden in Deutschland anhand von Bonituren im Bestand und unter Zuhilfenahme von amtlichen Warndiensten und Prognosesystemen terminiert. Optimierungen der Applikationszeitpunkte, sowie des Ressourceneinsatzes sind ökologisch und ökonomisch sinnvoll und anzustreben. Hierfür ist eine Detektion und Identifikation der Krankheit, sowie eine Quantifizierung des Befalls im Bestand wichtig (BOCK *et al.* 2010, GEBBERS & ADAMCHUK 2010).

Viele Pflanzenkrankheiten entfalten Symptome auf den Blättern ihrer Wirtspflanzen und verändern so deren Reflektanzeigenschaften auf charakteristische Weise (MAHLEIN *et al.* 2012). Diese Reflektanzeigenschaften werden in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen durch bestimmte Prozesse beeinflusst. Spektren der Blattoberfläche werden

maßgeblich durch den Gehalt an Pigmenten im sichtbaren Lichtbereich (ca. 400-600 nm) bestimmt. Der Wassergehalt des Blattgewebes beeinflusst verschiedene Wellenlängenbereiche zwischen 1000-2500 nm (ELVIDGE 1990).

Hyperspektrale Sensoren sind in der Lage, Prozesse während der Pathogenese anhand charakteristischer Veränderungen der Reflektanzeigenschaften nicht-invasiv zu detektieren. Diese Sensoren können einen Beitrag zur Optimierung des integrierten Pflanzenschutzes leisten (WAHABZADA *et al.* 2015, MAHLEIN 2016).

Diese Arbeit behandelt die Erfassung von spektralen Signaturen verschiedener Pflanzenkrankheiten und versucht diese zu charakterisieren und bestimmten Veränderungen in der Pathogenese der Pilze in den infizierten Blättern zuzuordnen.

2 Material und Methoden

Das für den Versuch benötigte Pflanzenmaterial wurde in Form von Saatgut durch die Firma KWS SAAT SE (Einbeck, Deutschland) zur Verfügung gestellt. Es handelte sich hierbei um Sommerweizen der Sorten „Taifun“ und „Chamsin“.

Die Inokulation erfolgte mit den Pathogenen *Septoria tritici*, *Drechslera tritici-repentis* und *Puccinia triticina*.

Die Aufnahme hyperspektraler Bilder erfolgte mit dem Linescanner „ImSpector V10“ der Firma SPECIM (Oulu, Finnland). Die zu messenden Blätter wurden auf einem Rahmen fixiert, um eine möglichst homogene horizontale Ausrichtung zu erreichen. Für jede Krankheit wurde eine Zeitreihe gemessen. Die Messungen erfolgten bei DTR und Braunrost täglich ab Tag 2 nach Inokulation bis Tag 12. Die Septoria-Zeitreihe umfasste, bedingt durch die lange Latenzzeit (Dauer Infektion bis Auftreten erster Symptome) des Pathogens, Messungen von Tag 15 bis Tag 30 nach Inokulation.

Die Auswertung der spektralen Daten erfolgte mittels ENVI Classic 5.3. Hierbei wurde das Tool „Regions Of Interest“ (ROI) verwendet, um die spektrale Veränderung befallener Pixel retrospektiv zu verfolgen.

Um spektrale Änderungen der Blattoberfläche zu erklären, wurden histologische Untersuchungen des befallenen Blattgewebes durchgeführt. Für die Untersuchung wurde die Fluoreszenz-Mikroskopie in Kombination mit dem Farbstoff Uvitex 2B genutzt.

3 Ergebnisse

Zeitreihenmessungen der untersuchten Pathogene zeigten deutliche spektrale Veränderungen auf der Blattoberfläche. Mit voranschreitender Symptomentwicklung ist eine zunehmende Veränderung der Reflektanzeigenschaften zu beobachten. Der Anteil gesunder Pixel in einer ROI verringert sich mit voranschreitender Symptomentwicklung der Krankheiten. Bei allen Pathogenen ist die Reflektanz im roten Wellenlängenbereich

(600-700 nm) deutlich erhöht (**Abbildung 1**). Besonders in der Septoria-Zeitreihe führt vor allem der Abbau von Chlorophyll zu einem starken Anstieg der Reflektanz im blauen Lichtbereich von 400-500 nm.

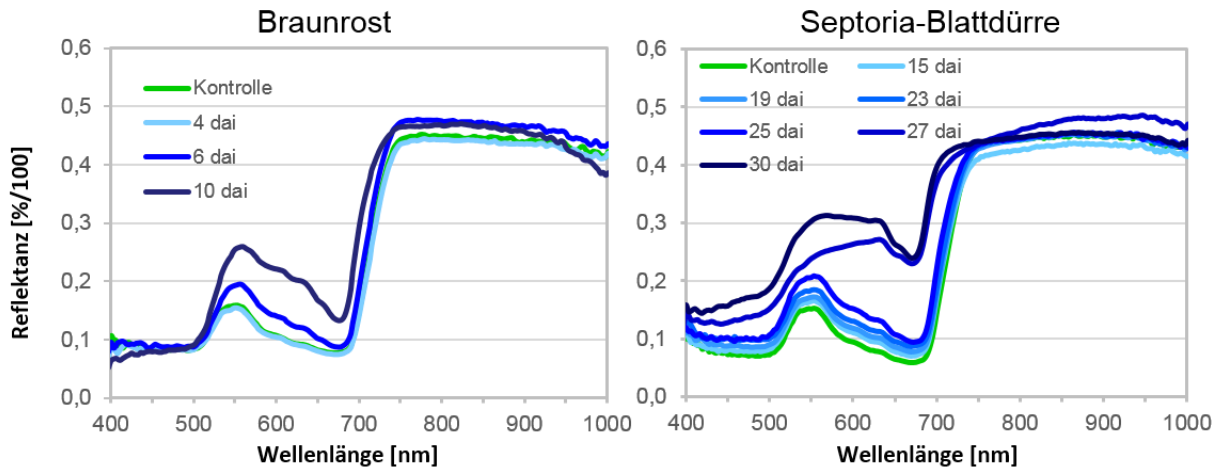


Abbildung 1: Spektrale Dynamik des Braunrosts (links) und der Septoria-Blattdürre (rechts) während der Messreihe (Mittelwert aus n=400 Pixel).

Ausgereifte Symptome des Braunrosts sind durch die Bildung von Uredosporen geprägt und weisen eine hohe Reflektanz im roten Lichtbereich von 600-700 nm auf (**Abbildung 2**). Die Uredosporen absorbieren jedoch den Großteil des einstrahlenden Lichts im blauen Spektralbereich (400-500 nm). Bei DTR führt die Nekrosenbildung mit einem dunklen Zentrum zu einer erhöhten Absorption im Bereich zwischen 650-700 nm. Das Spektrum von Septoria wird durch die flächige Bildung von Nekrosen beeinflusst. Im Zentrum dieser Nekrosen formen sich zusätzlich Pyknidien aus.

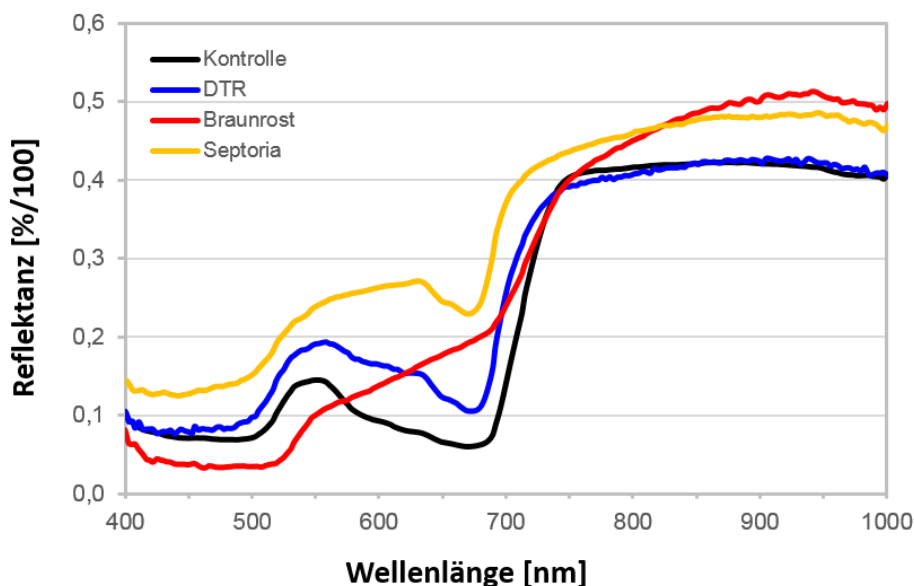


Abbildung 2: Spektraler Vergleich der typischen Symptomatik der untersuchten Blattkrankheiten (Mittelwert aus n=20 Pixel).

Histologische Untersuchungen mittels Fluoreszenz-Mikroskopie geben Hinweise darauf, welche Prozesse in der Pathogenese die Veränderungen in der Reflektanz verursachen. Verändert sich die spektrale Signatur zu einem bestimmten Zeitpunkt der Pathogenese, ist dies mit Veränderungen in der Wirt-Parasit-Interaktion gekoppelt. Diese Vorgänge sind auf Wachstumsprozesse des Pilzes innerhalb des Blattgewebes zurückzuführen. Der Anstieg der Reflektanz im roten Wellenlängenbereich von 600-700 nm bei Braunrost wird durch eine massenhafte Produktion von Uredosporen hervorgerufen (**Abbildung 3**).

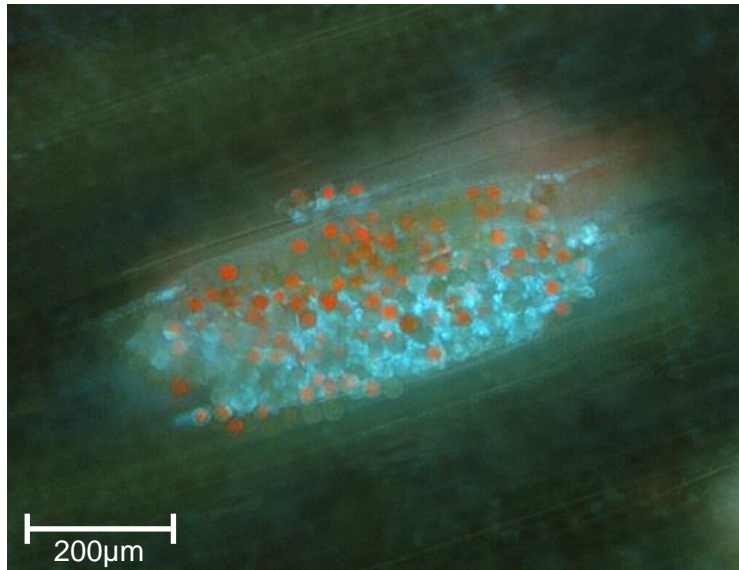


Abbildung 3: Fluoreszenzmikroskopische Untersuchung von *Puccinia triticina* im Wirtsgewebe 9 Tage nach Inokulation. Uredosporenlager mit unterschiedlich pigmentierten Uredosporen noch unter der Kutikula.

4 Diskussion und Ausblick

Blattkrankheiten des Weizens zeigen unterschiedliche Symptome auf Blättern. Diese Symptome werden durch spezifische Infektionsprozesse charakterisiert, die ein Pathogen nutzt, um seinen Wirt zu besiedeln. Durch die Ausprägung unterschiedlicher Symptome lassen sich Septoria-Blattdürre, DTR-Blattdürre und Braunrost im spektralen Vergleich voneinander unterscheiden. Zeitreihenmessungen erweisen sich als praktikable Methode, um die Ausprägung von Symptomen bestimmter Pflanzenkrankheiten auf der Blattebene spektral zu charakterisieren. Ziel ist es nun die auf der Skala der Blattebene gesammelten Informationen zu nutzen, um nach spezifischen Signaturen auf der Bestandesebene im Freiland zu suchen. Die oft widrigen Freilandbedingungen erschweren die Messungen im Feld und setzen eine möglichst detaillierte Kenntnis über die spektrale Dynamik von Pflanzenkrankheiten im Verlauf ihrer Pathogenese voraus.

Literaturverzeichnis

- BOCK C.H., POOLE G.H., PARKER P.E., GOTTWALD T.R. (2010):** Plant disease severity estimated visually, by digital photography and image analysis, and by hyperspectral imaging. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(2), 59-107.
- ELVIDGE C.D. (1990):** Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Remote Sensing*, 11(10), 1775-1795.
- GEBBERS R., ADAMCHUK V.I. (2010):** Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831.
- MAHLEIN A.K., STEINER U., HILLNHÜTTER C., DEHNE H.W., OERKE E.C. (2012):** Hyperspectral imaging for small-scale analysis of symptoms caused by different sugar beet diseases. *Plant methods*, 8(1), 3.
- MAHLEIN A.K. (2016):** Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241-251.
- WAHABZADA M., MAHLEIN A.K., BAUCKHAGE C., STEINER U., OERKE E.C., KERSTING K. (2015):** Metro maps of plant disease dynamics—automated mining of differences

Analyse und Klassifizierung von Hyperspektralaufnahmen auf der Basis proprietärer Softwareentwicklungen

Proprietary software tools for analysing and classifying hyperspectral images

Joachim Intreß, Martin Geyer

*Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy, Max-Eyth-Allee 100, D-14469 Potsdam, Germany
E-Mail: jintress@atb-potsdam.de*

Descriptor: bildgebende Spektroskopie, LabView

Für die Analyse komplexer Hyperspektraldaten, deren Fokus häufig vegetationspezifisch oder auf eine gezielte Anwendung in der Landwirtschaft ausgerichtet ist, hat sich gezeigt, dass kommerzielle Software zu wenig spezialisiert und damit ineffektiv ist, für einen wiederkehrenden Arbeitsablauf. Eigene Softwareentwicklungen können diese Lücke schließen und so die Klassifizierung von Hyperspektralaufnahmen erleichtern. Weiterhin können die ermittelten Klassifizierungsfaktoren stichprobenartig überprüft werden. Das hier vorgestellte Programm ist modular aufgebaut und wurde in LabView (National Instruments, Austin, USA) entwickelt. Damit ist eine relativ schnelle Erweiterung und Anpassung an neue Anforderungen gegeben.

Funktionell erfolgt eine einfache statistische Auswertung von Spektralprofilproben in einzelnen Bildregionen. Durch diese Vorverarbeitung kann unmittelbar entschieden werden, welche Bänder für die Klassifizierung herangezogen werden sollen. Das Zurückgreifen auf Scatterplots ist nur dann erforderlich, wenn keine klare Unterscheidung der einzelnen Bildregionen geben ist. Das Programm erlaubt es weiterhin, in einzelnen, hoch korrelierten Bandkombinationen, Diagrammwerte den entsprechenden Bildbereichen zuzuordnen. Auf diese Weise sind Überschneidungen zwischen den Bildregionen relativ leicht erkennbar. Ein Paket aus mehreren Softwarekomponenten erleichtert und beschleunigt die Analyse von Hyperspektraldaten bezüglich einer spektralen Klassifikation gegenüber einer Auswertung in kommerziell verfügbarer Software (z.B. ENVI (Harris Geospatial Solutions, USA)).

Das Freeware Programmpaket ist auf der Internet Seite des ATB zum download verfügbar unter:

<https://www.atb-potsdam.de/institut/fachabteilungen/technik-im-gartenbau/kompetenzen/sensortechnik/hyperspektralmessung.html>

Weitere Auskünfte erhalten sie von Herrn Intreß unter jintress@atb-potsdam.de

Kontrolle des Fruchtwachstums mit Smartphone-Kamera

Control of fruit growth with smartphone camera

Thorsten Rocksch¹, Wenjuan Yu¹, Franz Kirchberger², Uwe Schmidt¹

¹ Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Fachgebiet Biosystemtechnik, Albrecht-Thaer-Weg 3, 14195 Berlin, Deutschland

² Agrarsystem GmbH, Hanstr. 31, 96250 Ebersfeld

E-Mail: t.rocksch@agrar.hu-berlin.de

Zusammenfassung: Im vorliegenden Versuchsansatz soll das Fruchtwachstums mithilfe einer modifizierten Smartphone-Kamera erfasst werden. Als Projektziel steht zunächst eine möglichst exakte Größenbestimmung runder Früchte wie z.B. Tomaten. Zur Größenbestimmung werden Referenzflächen genutzt. Die Masken mit definierten Abmessungen können an die Beobachtungsobjekte angebracht werden und ermöglichen über entsprechende Umrechnungsalgorithmen eine exakte Größenbestimmung unabhängig von der Aufnahmeposition. Diese Masken müssen definierte auswertbare Muster tragen, damit Verdrehungen der Maske um eine Raumachse erkannt und verrechnet werden können.

Erste Ergebnisse zeigen, dass eine automatisierte Bildaufnahme und -auswertung zur Erfassung des Fruchtwachstums bei Tomate mittels Smartphone-Kamera möglich ist. Größenänderungen im Bereich weniger Quadratmillimeter werden sicher erkannt. Schwierigkeiten bereiten aktuell noch die sichere Autofokussierung auf die Fruchtränder und die Größenbestimmung nicht exakt runder Früchte bei unterschiedlicher Aufnahmeposition.

Deskriptoren: Smartphone-Kamera, Fruchtwachstum, Bildauswertung

Abstract: *In the present experiment, the fruit growth is to be recorded using a modified smart phone camera. Firstly, the project aims at correct sizing of round fruits like e.g. tomatoes, as precisely as possible. Reference areas are used to determine the size. The masks with defined dimensions can be attached to the observation objects and enable an exact assessment of the size independent of the recording position. These masks must have defined evaluable patterns, so that twists of the mask around a spatial axis can be recognized and offset. First results show that with a smartphone camera an automated image recording is possible to capture the fruit growth of tomatoes. Size changes in the range of a few square millimetres are detected reliably. At the moment, the exact focus on the fruit edges and the determination of the size of not exactly round fruits at different recording positions pose problems.*

Keywords: *Smartphone-camera, fruit-growth, image evaluation*

Einleitung

Am Fachgebiet Biosystemtechnik werden seit Jahren Pflanzensignale genutzt, um Steuerungs- und Regelungsalgorithmen für Gewächshäuser zu entwickeln (DANNEHL *et al.* 2012, ROCKSCH *et al.* 2012, SCHMIDT *et al.* 2014). Die Erfassung des Fruchtwachstums spielt in Zusammenhang mit anderen Phytosignalen eine wichtige Rolle im Phytomonitoring. Zur Messung des Fruchtwachstums wurde ein Sensor der Fa. PhyTech Ltd. (Yad Mordechai, Israel) geprüft. Innerhalb des Gesamtsystems LPS-05 MD sind zwei verschiedene Sensoren für runde (z.B. Tomate) und längliche Früchte (z.B. Gurke) getestet worden (**Abbildung 1**). Die Messzangen sind mit induktivem Geber ausgestattet und erreichen nach Herstellerangaben eine Genauigkeit von 3-10 μm .



Abbildung 1: Fruchtwachstumssensor FI-3EA/9 der Fa. Phytech Ltd.

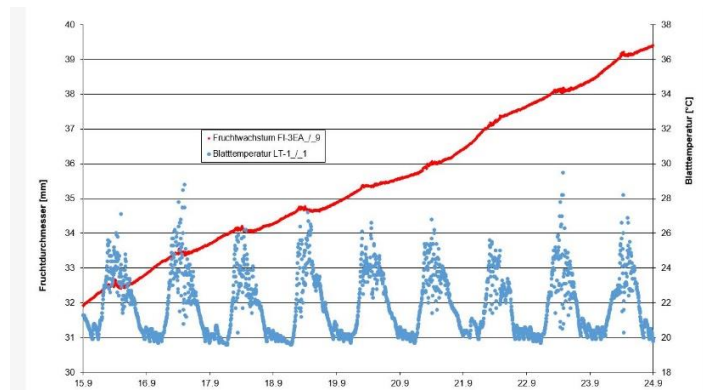


Abbildung 2: Fruchtwachstum und Blattemperatur über 9 Tage, erfasst mit dem Phytomonitor LPS-05 MD der Fa. Phytech Ltd.

Die Auswertungen zeigten einen deutlich messbaren täglichen Fruchtzuwachs bei Tomaten zwischen 0,5 und 1 mm innerhalb eines Tages. Bei hohen Blattemperaturen (in der Regel verbunden mit hoher Einstrahlung) werden regelmäßig mittägliche Stagnationsphasen beim Fruchtwachstum beobachtet (**Abbildung 2**).

Die Handhabung der Wachstumssensoren gestaltete sich als nicht ganz einfach. Die Klammern fielen zum Teil von den Früchten ab oder verrutschten, so dass sich eine kontinuierliche Messung über einen längeren Zeitraum als schwierig erwies. Darüber hinaus wird dieses Phytomonitoring-System seit einiger Zeit nicht mehr angeboten, so dass nach Alternativen gesucht wurde. Bevorzugt werden sollte ein berührungslos arbeitender Sensor, der eine ausreichende Messwertgenauigkeit aufweist und einfach im Pflanzenbestand einzusetzen ist.

Zur bildgebenden Objektbeobachtung können einfache Kamerasysteme genutzt werden, die über Serienbildfunktionen in vordefinierten Intervallen Aufnahmen vornehmen. Durch Veränderungen der Umgebungsbedingungen (pflanzliches Wachstum, Bewegungen, Lichtverhältnisse) ist es jedoch schwierig, automatisierte Auswertalgorithmen anzuwenden. Außerdem werden in der Regel statische Aufnahmepunkte gewählt, die nur einen kleinen Teil der zu untersuchenden Fläche abdecken. Exakte Messsysteme,

wie 3-D-Laserscanner, ermöglichen eine sehr schnelle und millimetergenaue Abbildung der Realität. Allerdings sind entsprechende Systeme kostenintensiv und arbeiten nicht autark.

Material und Methoden

Im vorliegenden Versuchsansatz sollte das Fruchtwachstums mithilfe einer modifizierten Smartphone-Kamera erfasst werden. Verwendet wurde eine Smartphone-Kamera vom Fabrikat Nokia 1020 mit einem vorgesetzten Makroaufsatz.

Als Projektziel stand zunächst eine möglichst exakte Größenbestimmung runder Früchte wie z.B. Tomaten. Zur Größenbestimmung werden Referenzflächen genutzt. Die Masken mit definierten Abmessungen können an die Beobachtungsobjekte angebracht werden und ermöglichen über entsprechende Umrechnungsalgorithmen eine exakte Größenbestimmung unabhängig von der Aufnahmeposition. Diese Masken müssen definierte auswertbare Muster tragen, damit Verdrehungen der Maske um eine Raumachse erkannt und verrechnet werden können.

Im Verlauf der Entwicklung des Messsystems wurde zunächst eine halbrunde Maske verwendet, über der die Früchte platziert wurden (**Abbildung 3** und **4**). Unter Laborbedingungen, bei homogener und deutlich zur Fruchtfarbe veränderter Hintergrundfarbe konnten sehr genaue und reproduzierbare Fruchtgrößenmessungen realisiert werden. Dagegen ergaben sich Schwierigkeiten beim Einsatz im Gewächshaus mit unterschiedlichen Hintergrundfarben und wechselnden Lichtbedingungen.



Abbildung 3 und 4: Halbkreismaske unter Labor- und Gewächshausbedingungen bei roten Tomaten

Zur Verbesserung der Masken wurden verschiedene Hintergrundfarbtöne und Markierungspunkte (Templates) getestet. Für Tomaten erwies sich eine Maske am geeignetsten, die eine einzelne Frucht innerhalb eines Fruchtstandes umfasst und mit einer blauen Hintergrundfarbe ausgestattet ist (**Abbildung 5** und **6**). Die Bildverzerrungen durch

die aufgesetzte Makrolinse können durch die 4 mit aufgenommenen Templates im Auswertalgorithmus verrechnet werden.

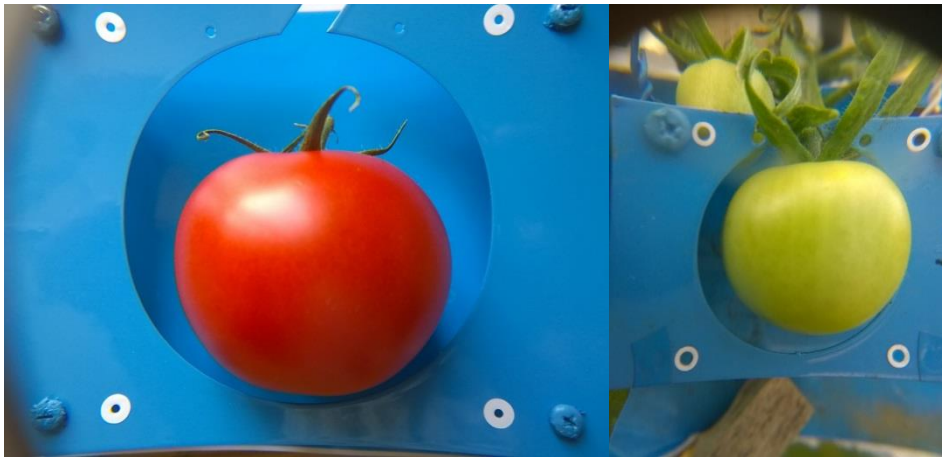


Abbildung 5 und 6: neue Maske mit Markierungspunkten unter Labor- und Gewächshausbedingungen

Zur Kameraansteuerung wurde durch die Fa. Agrarsysteme GmbH eine Software entwickelt, die es ermöglicht, vom Büroarbeitsplatz alle relevanten Parameter vorzugeben (**Abbildung 7**). Dabei sind neben der Startzeit auch beliebige Intervalle für Serienaufnahmen einstellbar. Des Weiteren wird die Blitzfunktion und die Fokussierung voreingestellt.

Abbildung 7: Auftragsmanager zur Kamerafernsteuerung

Die Kamera erhält über den Auftragsmanager alle Aufnahmeparameter aufgespielt. Dabei werden der aktuelle Fokuswert und der Fortschritt der Auftragsbearbeitung angezeigt (**Abbildung 8**). Die Maske sollte im Pflanzenbestand so angebracht werden, dass eine einheitliche Hintergrundfarbe aufgenommen wird und alle Templates mit den Aufnahmen erfasst werden (**Abbildung 9**).

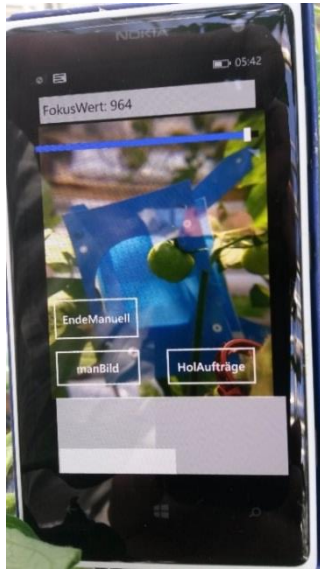


Abbildung 8: Smartphone-Oberfläche des Auftragsmanagers



Abbildung 9: Kamera im Pflanzenbestand

Die automatisch aufgenommenen Bilder werden von der Smartphone-Kamera direkt auf einer Cloud abgelegt, so dass diese von einem beliebigen Rechner mit entsprechender Software und Zugang abgerufen werden können.

Zur Auswertung der Bilddateien ist ein weiteres Programm erstellt worden. Hier werden zunächst Angaben zum verwendeten Template (Markierungspunkte auf der Maske) und der Maskengröße abgefragt. Es können einzelne Bilder oder Ordner mit Bildern ausgewählt werden, die den Auswertalgorithmus durchlaufen sollen. Weitere Optionen zur Voreinstellung sind in **Abbildung 10** dargestellt.

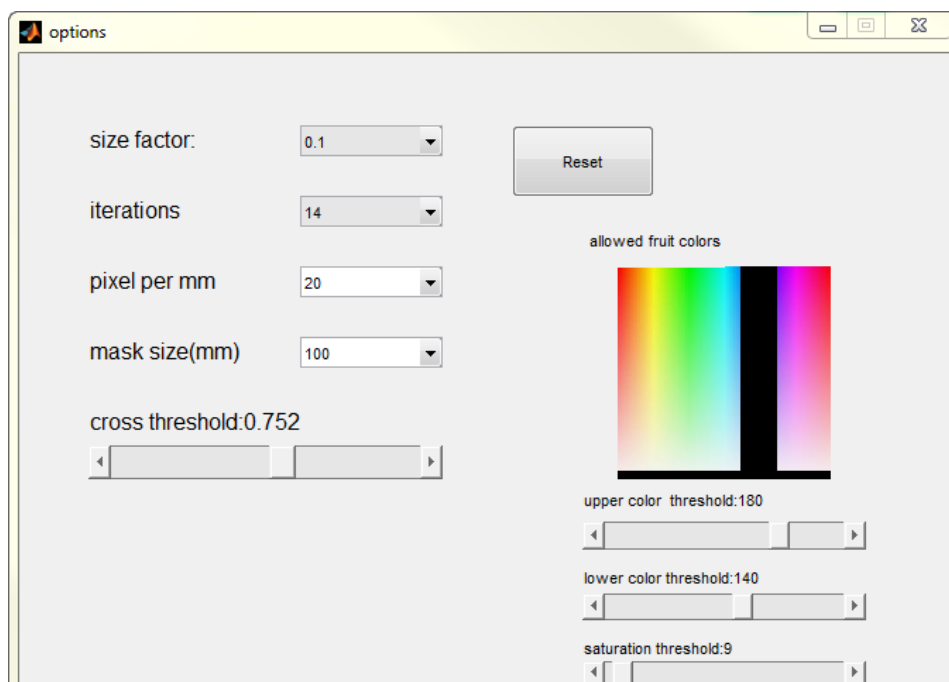


Abbildung 10: Voreinstellungen zum Auswertalgorithmus

Mit dem 'size factor' wird die Geschwindigkeit des Programmablaufs beeinflusst, 'iterations' verändert die Erkennbarkeit der Templates. Eine Erhöhung der 'pixel per mm' verbessert die Genauigkeit der Messung, führt aber auch zu einer längeren Rechenzeit. Hierbei muss auch die Auflösung des Ausgangsbildes beachtet werden, die als limitierende Größe für die Messgenauigkeit steht. Als 'mask size' muss der exakte Abstand der Templates eingegeben werden. Die Farbwerte dienen der Abgrenzung des Fruchtbereiches von der Hintergrundfarbe. Die 'upper' und 'lower color threshold' grenzen den Farbbereich der Hintergrundfarbe ein. Dieser Farbbereich wird bei der Berechnung entfernt. Dunkle Fehldetektionen an den Fruchträndern können über den 'saturation threshold' herausgefiltert werden.

Ergebnisse und Diskussion

Nach dem Start der Auswerteroutine werden die Bilder nacheinander geöffnet und verarbeitet. Als Ausgabe erscheinen für jede Aufnahme getrennt Ausgabeblätter (**Abbildung 11** und **12**). Im oberen Bereich sind anhand der Templates die Bildverzerrungen visualisiert, die in weiteren Schritten herausgerechnet werden. Im großen Fruchtbild (Mitte) wird mit einer blauen Linie die Abgrenzung der Frucht zum Hintergrundbild visualisiert, die für die Berechnung der Flächengröße verwendet wird. Über eine Exportfunktion können die Daten, welche unten links angezeigt werden, und das Schnittbild exportiert werden. Es wird als .csv und .jpeg gespeichert.

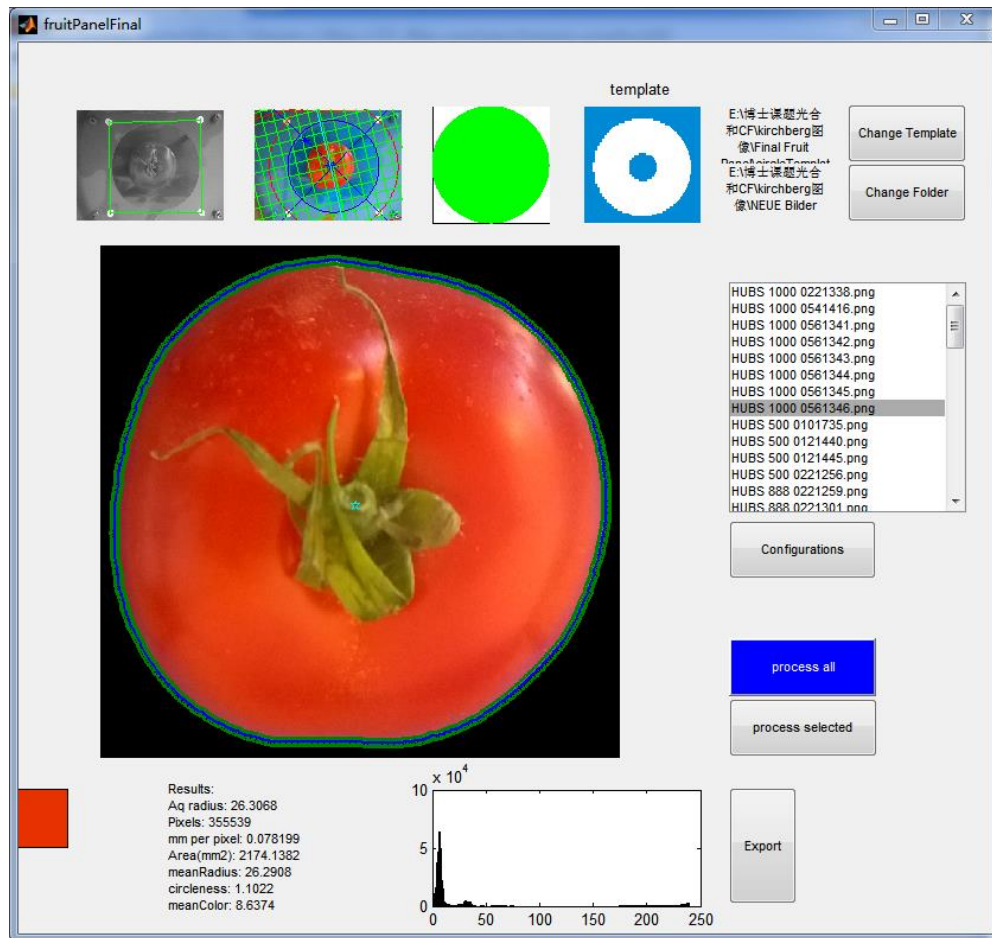


Abbildung 11: Auswertblatt für eine runde Tomatenfrucht, aufgenommen unter Laborbedingungen

Als Ausgabegrößen werden der Fruchtradius, die Gesamtpixel-Anzahl der Frucht, die Pixelgröße, der Flächeninhalt und der Hauptfarbwert angegeben. Wird mit der Aufnahme der Fruchtrand vollständig abgebildet, ist eine sehr exakte und reproduzierbare Fruchtgrößenbestimmung auch bei verschiedenen Aufnahmepositionen möglich. Im Bestand verdecken jedoch häufig der Stielansatz oder Blütenblätter den Fruchtrand, so dass eine saubere Abgrenzung zum Hintergrund erschwert wird (**Abbildung 10**). Hier der Fruchtrandbereich mit geeigneten mathematischen Algorithmen ermittelt. Dabei kann es bei unterschiedlichen Aufnahmewinkeln zu Abweichungen bei der Bestimmung der Fruchtgröße kommen.

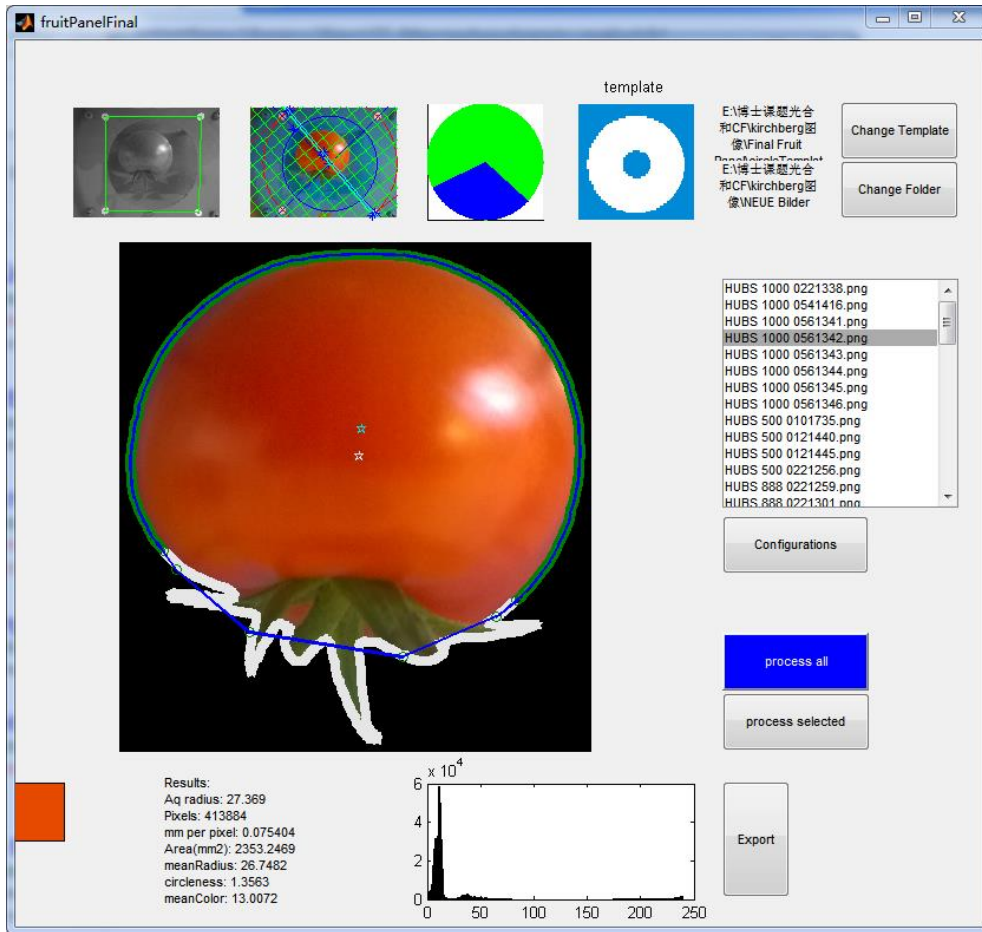


Abbildung 12: Auswertblatt für eine runde Tomatenfrucht mit Stielansatz und Blütenblättern, blaue Linie mit kalkulierte Fruchttrandbereich

Fazit

Erste Ergebnisse zeigen, dass eine automatisierte Bildaufnahme und -auswertung zur Erfassung des Fruchtwachstums bei Tomate mittels Smartphone-Kamera möglich ist. Größenänderungen im Bereich weniger Quadratmillimeter werden erkannt. Schwierigkeiten bereiten aktuell noch die sichere Autofokussierung auf die Fruchttränder und die Größenbestimmung nicht exakt runder Früchte bei unterschiedlicher Aufnahmeposition sowie verdeckte Fruchttrandbereiche.

Literaturverzeichnis

- DANNEHL D., HUBER C., ROCKSCH T., HUYSKENS-KEIL S.; SCHMIDT U. (2012):** Interactions between changing climate conditions in a semi-closed greenhouse and plant development, fruit yield, and health-promoting plant compounds of tomatoes, *Scientia Horticulturae*, 138, 235-243.
- ROCKSCH T., SCHUCH I., DANNEHL D., SCHMIDT U. (2012):** Technical developments in phytomonitoring-technology. Second Symposium on Horticulture in Europe, Angers, France, Book of Abstracts, 73
- SCHMIDT U., SCHUCH I. DANNEHL D., ROCKSCH T., SALAZAR-MORENO R., ROJANO-AGUILAR A., LÓPEZ-CRUZ I.L. (2014):** Long time plant response measurements for yield prediction, water use and climate control optimization using gas exchange measurements in semi closed and ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae* 1037, 469-476

Abschätzung der Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturen auf Basis von UAV-Spektraldaten und deren Änderung am Beispiel unterschiedlicher Landnutzungssysteme

Philipp Rauneker, Johannes Hufnagel, Gunnar Lischeid

*Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Deutschland
E-Mail: philipp.rauneker@zalf.de*

Fernerkundungsdaten bilden seit langem die Grundlage für die räumliche Abschätzung der Evapotranspiration in meso- und makroskaligen Untersuchungsgebieten. Viele der dafür eingesetzten Sensoren bieten jedoch für kleinräumige Fragestellungen (0,01 – 10ha) meist eine zu geringe räumliche Auflösung. Die direkte Messung der Verdunstung mit herkömmlichen Methoden auf der anderen Seite liefert punktuelle Messwerte von vergleichsweise hoher Genauigkeit. Diese können durch Extrapolation und die Anwendung empirischer und statistischer Verfahren in Flächenwerte umgewandelt werden, sind jedoch nicht in der Lage die Heterogenität der Landschaft und den Einfluss räumlicher Strukturen abzubilden.

UAVs stellen durch die zunehmende Verfügbarkeit hochwertiger Sensoren und Prozessierungs-Tools ein vielversprechendes Werkzeug für die wiederholte und automatisierte Erfassung hochauflösender Spektraldaten in mikroskaligen Untersuchungsgebieten dar. Für die Berechnung der aktuellen Verdunstung werden spektrale Daten im sichtbaren und nah-infraroten Wellenlängenbereich zusammen mit zeitgleich am Boden erfassten meteorologischen Parametern als Eingangsgrößen in ein physikalisches Energiebilanzmodell verwendet. Hierbei bilden die spektralen Eigenschaften der Vegetation, welche als Bindeglied zwischen Boden und Atmosphäre den größten Einfluss auf die Evapotranspiration von Landoberflächen hat, die Grundlage der Berechnungen. In dieser Arbeit wird die Anwendung von UAV-Spektraldaten zur flächenhaften Ermittlung der Evapotranspiration landwirtschaftlicher Nutzflächen gezeigt. Dies beinhaltet die Aufbereitung und Prozessierung der Rohdaten sowie die Anwendung des „Two source energy balance“ Modells (TSEB) zur Ermittlung des latenten Wärmestroms. Am Beispiel zweier unterschiedlicher Nutzungssysteme sollen die Auswirkungen mehrerer Kombinationen von Bodenbearbeitung, Bewässerung und Fruchtwechsel auf das Transpirationsverhalten von Maispflanzen untersucht werden. Erste Ergebnisse zur Veränderung der Verdunstungsmuster zwischen zwei verschiedenen Wachstumsstadien werden präsentiert.

UAS-basierte Abschätzung von Gründungsbiomasse: Bieten photogrammetrisch ermittelte Pflanzenhöhen eine Alternative zu Vegetationsindizes?

UAS-based prediction of cover crop biomass: Do photogrammetrically detected plant heights provide an alternative to vegetation indices?

Lukas Roth^{1*}, Nicole Berger², Fabienne Bauer², Bernhard Streit²

¹ Institut für Agrarwissenschaften, ETH Zürich, Universitätstr. 2, 8092 Zürich, Schweiz.

² Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Berner Fachhochschule, Länggasse 85, 3052 Zollikofen, Schweiz.

E-Mail: *luroth@student.ethz.ch

Zusammenfassung: Der Einsatz von Gründüngung als Zwischenkultur ist mittlerweile weit verbreitet in der europäischen Landwirtschaft. Zusätzlich zum beabsichtigten Düngungseffekt können durch Vergleichen der final erreichten Biomasse der Zwischenkultur wertvolle Informationen über das räumlich verschiedene Wachstumspotential des Bodens gewonnen werden. In unserer Studie haben wir neun verschiedene Gründüngungs-Arten mittels semi-professionellen Kameras im sichtbaren und im nahen Infrarot-Bereich mithilfe einer Drohne (Unmanned Aerial System, UAS) erfasst. Die Einzelfotos wurden anschliessend photogrammetrisch prozessiert und zu Orthofotos und digitalen Oberflächen-Modellen verarbeitet. Danach wurde die Pflanzenhöhe, der Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), der Red Edge Inflection Point (REIP) und der Green Red Vegetation Index (GRVI) berechnet. Als letzter Schritt wurde die Biomasse mittels destruktiver Proben bestimmt und mit den ermittelten Fernerkundungs-Daten verglichen. Die Biomasse korrelierte am stärksten mit der Pflanzenhöhe, und ein lineares Regressions-Modell zeigte gute Resultate ($R^2 = 0.58$). Die Vegetations-Indizes hingegen korrelierten auf einem Arten-unabhängigen Level weniger signifikant und weniger stark mit der Biomasse, nur für einzelne ausgewählte Arten war die Korrelation weiterhin hoch. Wir folgern daraus, dass die Pflanzenhöhe eine gute Basis für einen Arten-unabhängigen, nicht-destruktiven Biomassen-Indikator bietet, wohingegen die Performance der Vegetationsindizes eher Arten-abhängig ist.

Deskriptoren: UAS, Biomasse, Pflanzenhöhe, Vegetationsindex, Gründüngung

Abstract: *In Europe, the use of cover crops in agriculture is common. In addition to the fertilization effect, cover crops offer a possibility to analyze the (potentially differing) soil condition. In our study, visible and near-infrared photography was performed on an ex-*

perimental field site with nine different cover crops. A lightweight unmanned aerial system (UAS) served as platform, consumer cameras as sensors. Photos were photogrammetrically processed to orthophotos and digital surface models. Then, plant height, normalized differenced vegetation index (NDVI), red edge inflection point (REIP), and green red vegetation index (GRVI) were extracted. Finally, destructive biomass samples were taken and compared with the remotely-sensed characteristics. Biomass correlated best with plant height, and good approximations with linear regressions were found ($R^2 = 0.58$). The vegetation indices showed less significant and less strong overall correlations, but performed well for certain species. It is therefore evident that the use of plant heights provides a feasible approach to a species-independent non-destructive biomass determination, where the performance of vegetation indices is more species-dependent.

Keywords: UAS, biomass, plant height, vegetation index, cover crop

1 Einleitung

Das Erkennen von räumlichen Unterschieden im Wachstumspotential von Böden stellt ein wichtiger Schritt in der Umsetzung von Präzisionslandwirtschafts-Techniken dar. Häufig werden Vegetationsindizes basierend auf Nahinfrarot-Bildern (NIR), wie etwa der Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) und der Red Edge Inflection Point (REIP), als Indikatoren vorgeschlagen (THENKABAIL *et al.* 2000, TILLY *et al.* 2015). Ebenfalls diskutiert werden Indizes, die auf dem Rot, Grün, Blau-Farbraum (RGB) basieren, wie zum Beispiel der Red Green Blue Vegetation Index (RGBVI) (TILLY *et al.* 2015). Ein weiterer potentiell nützlicher Indikator kann die Pflanzenhöhe darstellen (YIN *et al.* 2011). Structure from Motion (SfM) Algorithmen erlauben es, digitale Höhenmodelle aus UAS-basierten Bildern zu extrahieren (DANDOIS & ELLIS 2010). Durch den Vergleich von Höhenmodellen zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten kann damit die Pflanzenhöhe extrahiert werden.

Verschiedene Gründüngungspflanzen unterscheiden sich stark in Oberflächeneigenschaft, Farbe, Bodenbedeckungsgrad, Morphologie und als Konsequenz spektraler Reflektanz. Es ist unklar, inwieweit diese Unterschiede Vegetationsindizes, aber auch digital ermittelte Pflanzenhöhen beeinflussen. Unserer Studie (ROTH & STREIT 2017) setzte an diesem Punkt an und hat die Eignung von Vegetationsindizes und Pflanzenhöhe zur Abschätzung der Biomasse anhand eines Feldversuches mit neun verschiedenen Gründüngungs-Arten untersucht.

2 Material und Methoden

Der Feldversuch fand in Leuzigen (Schweiz) statt und war Teil eines etablierten konservierenden Landwirtschaftssystems. Die eingesetzten Gründüngungs-Arten setzten sich zusammen aus *Pisum sativum arvense* L. (Futtererbse), *Vicia faba* L. (Ackerbohne), *Trifolium alexandrinum* L. (Alexandrin-Klee), *Trifolium resupinatum* L. (Persischer

Klee), *Vicia sativa* L. (Futterwicke), *Lupinus albus* L. (weisse Lupine), *Lens culinaris* MEDIK. (Linse), *Linum usitatissimum* L. (Saat-Lein) und *Cannabis sativa* L. (Hanf). Die Bilderfassung erfolgte mit einem ARF Mikrokopter Okto XL (HiSystems GmbH, Moorerland, Deutschland). Als RGB-Sensor diente eine Canon EOS 100D (Canon, Tokyo, Japan) mit einem Voigtländer SL II - N 20 mm / F 3,5 Color Skopar Objektiv (Voigtländer, Braunschweig, Deutschland). Als NIR-Sensor diente eine Tetracam Mini-MCA (Tetracam Inc., Chatsworth, U.S.A.). Die erfassten Bilder wurden mit der SfM-basierten Software Agisoft PhotoScan Profession 1.1.6 (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russland) prozessiert. Aus den so produzierten RGB und NIR Orthofotos sowie dem digitalen Höhenmodell wurden NDVI, REIP, GRVI und die Pflanzenhöhe extrahiert. Zeitgleich zur Bilderfassung wurde die Biomass der einzelnen Versuchsplots erfasst. Die so ermittelten Daten wurden mittels einer Korrelations-Analyse verglichen, anschliessen wurde jeder Vegetationsindex sowie die Pflanzenhöhe mittels eines mixed-effects Model geprüft (Resultate hier nicht gezeigt). Falls das mixed-effects Model einen signifikanten Einfluss des Vegetationsindex oder der Pflanzenhöhe auf die Biomasse nachwies, wurde danach eine lineare Regression durchgeführt, um die Eignung als Arten-unabhängiger Biomassen-Indikator zu überprüfen (**Abbildung 1**).

(Für weitere Details sowie hier nicht gezeigte Resultaten siehe ROTH & STREIT 2017)

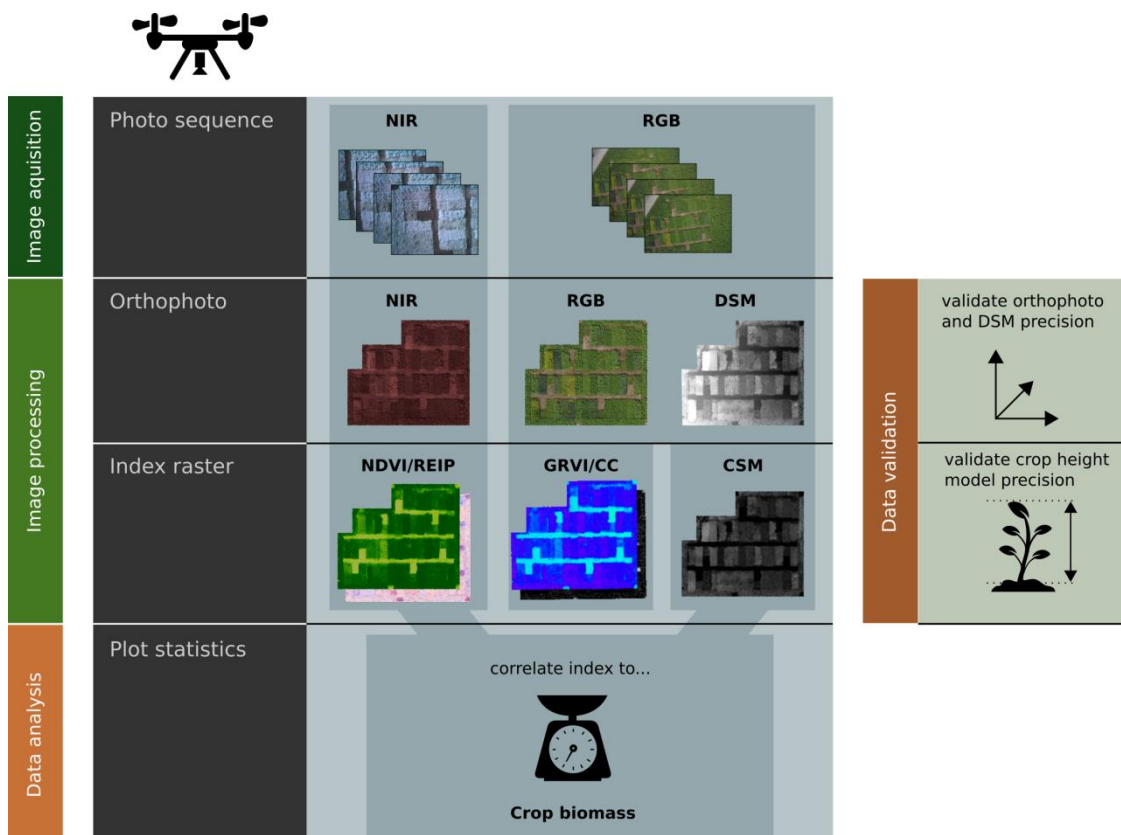


Abbildung 1: Methodische Übersicht (Abbildung basierend auf ROTH & STREIT 2017, angepasst)

3 Ergebnisse

Der NDVI und REIP zeigten einen klaren Sättigungs-Effekt bei höheren Biomassen (**Abbildung 2b** und **c**). Der GRVI zeigte nur bei einigen Arten einen Sättigungseffekt, während er bei anderen gut mit der Biomasse korrelierte (**Abbildung 2a**). Die Pflanzenhöhe korrelierte für alle Arten signifikant mit der Biomasse (**Abbildung 3**). Das gleiche Bild zeigte sich im mixed-effects Model: Nur die Pflanzenhöhe zeigte einen signifikanten Einfluss auf die Biomasse, während die Vegetationsindizes alle keinen signifikanten Einfluss zeigten. Die lineare Regression wurde als Folge nur für die Pflanzenhöhe durchgeführt. Eine gute Näherung mit einem R^2 von 0.579 wurde gefunden (**Abbildung 3**).

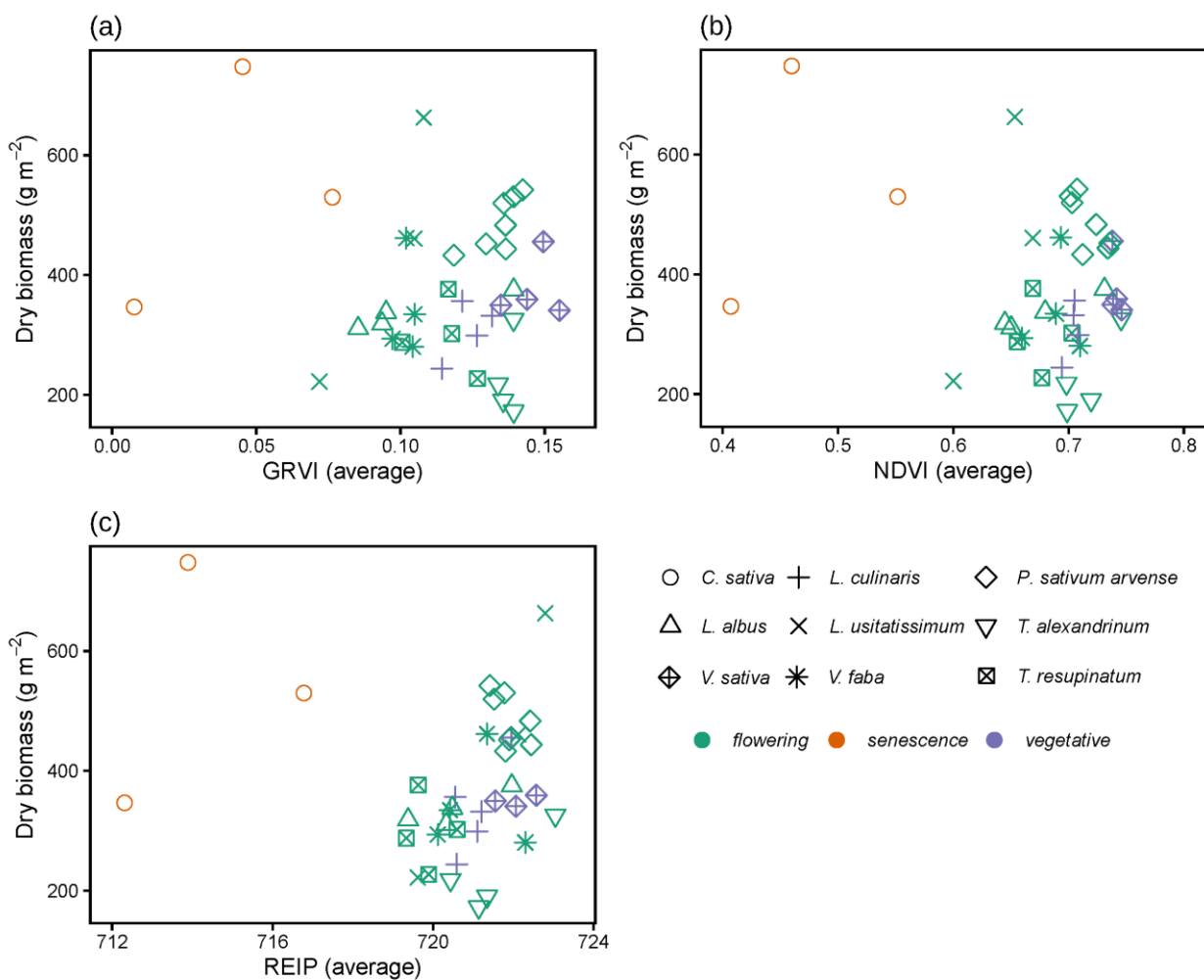


Abbildung 2: Biomasse versus Vegetationsindex. (a) Green Red Vegetation Index, (b) Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), (c) Red Edge Inflection Point (REIP). (Abbildung basierend auf ROTH & STREIT 2017, angepasst)

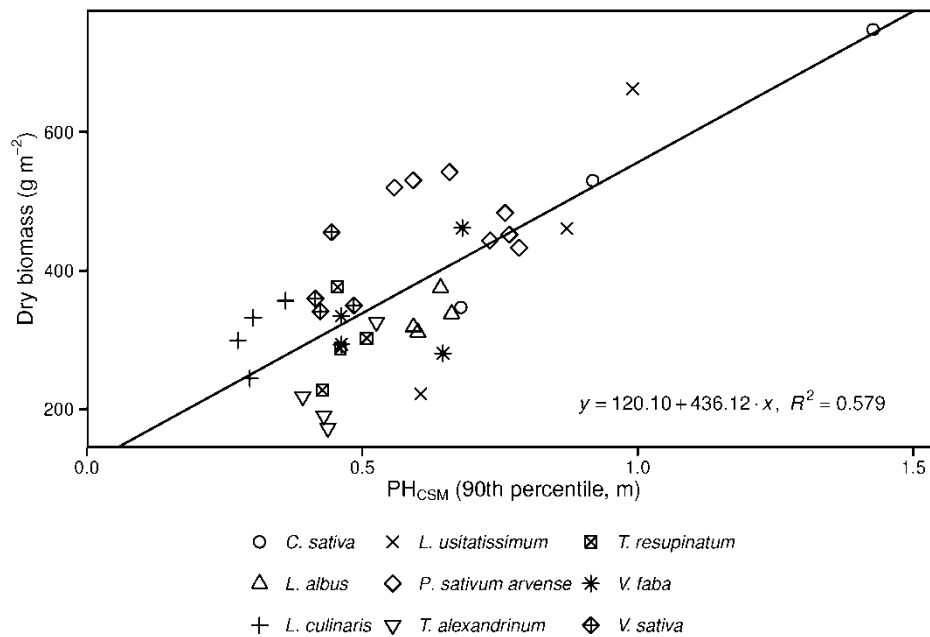


Abbildung 3: Regression zwischen Pflanzenhöhe aus digitalem Höhenmodell (PH_{CSM}) und Biomasse. (Abbildung basierend auf ROTH & STREIT 2017, angepasst)

4 Diskussion

Für die untersuchten Gründungen hat sich die Pflanzenhöhe als stabiler Biomasse-Indikator erwiesen. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit Resultaten für Gerste (BENDIG *et al.* 2014, TILLY *et al.* 2015). Nichtsdestotrotz wurden Einschränkungen festgestellt: Für Pflanzen, die mehr flächig als in die Höhe wachsen, blieb die Korrelation der Pflanzenhöhe mit der Biomasse gering (*V. faba*, *V. sativa*, *T. resupinatum* und *P. sativum arvense*).

Die Eignung der Vegetationsindizes als Biomasse-Indikator scheint sehr Artenabhängig zu sein. Der GRVI zum Beispiel korrelierte für *L. albus* sehr gut mit der Biomasse, für eine zweite Gruppe von Pflanzen (*L. culinaris*, *P. sativum arvense*, *C. sativa* und *L. usitatissimum*) ausreichend gut, und für eine dritte Gruppe (*T. alexandrinum*, *T. resupinatum* und *V. sativa*) sehr schlecht. Wiederum repräsentiert die letzte Gruppe Pflanzen, die eher flächig als in die Höhe wachsen. Andere Gründe für das schlechte Abschneiden der Vegetationsindizes sind vermutlich Sättigungseffekte (TILLY *et al.* 2015, THENKABAIL *et al.* 2000).

Zusammengefasst konnten zwei Tendenzen beobachtet werden: Für Gründungsarten, die am Ende der Kulturperiode Seneszenz erreichen, sind Vegetationsindizes kein geeigneter Biomasse-Indikator, während die Pflanzenhöhe sehr wohl als Indikator dienen kann. Falls Lagerung auftritt, verlieren alle untersuchten Indizes ihre Eignung als Indikator. Abgesehen von diesen zwei Einschränkungen sind Vegetationsindizes gute Arten-abhängige Biomasse-Indikatoren, während die Pflanzenhöhe als Arten-unabhängiger Biomasse-Indikator dienen kann.

Literaturverzeichnis

- BENDIG J. et al. (2014):** Estimating biomass of barley using Crop Surface Models (CSM) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6, pp.10395–10412.
- DANDOIS J.P., ELLIS E.C. (2010):** Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. *Remote Sensing*, 2, pp.1157–1176.
- ROTH L., STREIT B. (2017):** Predicting cover crop biomass by lightweight UAS-based RGB and NIR photography: an applied photogrammetric approach. *Precision Agriculture*, pp.1–22. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11119-017-9501-1>.
- THENKABAIL P.S., SMITH R.B., DE PAUW E. (2000):** Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71(99), pp.158–182.
- TILLY N., AASEN H., BARETH G. (2015):** Fusion of Plant Height and Vegetation Indices for the Estimation of Barley Biomass. *Remote Sensing*, 7, pp.11449–11480.
- YIN X. et al. (2011):** In-Season Prediction of Corn Yield Using Plant Height under Major Production Systems. *Agronomy Journal*, 103(3), pp.923–929.

Nutzung von boden- und luftgestützten Spektraldaten zur Optimierung der Stickstoff Düngung in der Zuckerrübe

Investigation of ground based and airborne spectral information for Nitrogen fertilizer application optimization in sugar beet

Corinne Müller-Ruh, Frank Liebisch, Johannes Pfeifer, Achim Walter

*Crop Science Lab, Institute of Agricultural Sciences, Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), Universitätsstrasse 2, 8092 Zürich, Schweiz
E-Mail: frank.liebisch@usys.ethz.ch, corinne.ruh@alumni.ethz.ch*

Zusammenfassung: Eine bedarfsgerechte Versorgung mit Stickstoff (N) ist für das Wachstum, den Ertrag sowie die Qualität einer Feldfrucht, aber auch für die Reduktion von N-Emissionen in die Umwelt unabdingbar. Heutzutage wird N meist in einer einheitlichen Gabe ausgebracht. Eine Möglichkeit die N-Effizienz zu steigern bieten variable Ausbringungsmethoden (VRA), wobei ortsabhängig unterschiedliche Mengen N ausgebracht werden. Auf dem Markt sind mehrere Produkte erhältlich, mit welchen der N-Bedarf im Feld bestimmt werden kann, wie die am Traktor montierten Systeme Greenseeker und Yara N-Sensor oder mit Sensoren ausgestattete unbemannte Fluggeräte (UAV). Das Ziel dieser Studie ist die Prüfung gängiger spektraler Methoden hinsichtlich ihrer Eignung N-Düngearten abzuleiten. Es wird die Hypothese getestet, ob die simultane Interpretation mehrerer Indizes die Verlässlichkeit der abgeleiteten Düngeempfehlungen erhöht. Das dafür verwendete Datenmaterial beinhaltet boden- und luftgestützte Spektraldaten aus dem Zuckerrübenexperiment des Flourish-Projekts. Aktuell verwendete und etablierte spektrale Indizes (SI) zur Detektion der N-Versorgung wurden evaluiert und mit neueren Entwicklungen und Index-Kombinationen verglichen. Die untersuchten Methoden werden hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Skalierbarkeit diskutiert.

Deskriptoren: Spektrale Indikatoren, Stickstoffdüngung, teilflächenspezifische Düngung, Zuckerrübe, UAV, Flourish, Fernerkundung

Abstract: *An adequate supply of nitrogen fertilizer (N) is crucial for growth, development, yield and quality of crops, but also for the necessary reduction of N emissions to the environment. N is usually still applied by a uniform rate for the whole field, which inevitably results in over- and undersupply to different regions in the field. One approach to improve the N-efficiency is variable-rate-application (VRA). On the market several products to detect the variability of N-demand are available, such as the tractor-based Greenseeker and Yara N-Sensor, or aerial systems such as unmanned aerial vehicles*

(UAV) carrying sensors. The aim of this study is to test currently used spectral methods on ground and aerial data derived from two years of sugar beet experimentation in the framework of the Flourish-project and compare their efficiency and suitability in N-fertilization recommendation. We compare a set of currently used or well established spectral indicators for N status detection, with some newer developments including index-combinations, as those are currently tested by the remote sensing community. We hypothesize that multi-parameter interpretation schemes increase the reliability of derived fertilizer application indications. The shown approaches will be discussed with regard to accuracy and scalability.

Keywords: Spectral indices, Nitrogen Fertilization, VRA, Sugar Beet, UAV, Flourish, dual parameter indices, remote sensing

1 Einleitung

Fernerkundungsgerätschaften zur VRA sind kommerziell erhältlich, ihre Einsatzsicherheit ist jedoch zumeist stark von firmenspezifischen Kalibrationen abhängig (CONSTANTIN *et al.* 2015). Oft können sie nur in engen Zeitfenstern eingesetzt werden und die Einsatzmöglichkeiten sind auf wenige Kulturen beschränkt. Die genaue Funktionsweise ist zumeist unbekannt, was wissenschaftliche Vergleiche erschwert (TREMBLAY 2009, WHELAN 2015). In dieser Untersuchung werden gängige spektrale Methoden in der Zuckerrübe getestet. Eine adäquate N-Düngung in der Zuckerrübe ist besonders wichtig, da unzureichende Mengen zu Ertragseinbußen führen, während überschüssige N-Gaben den extrahierbaren Zuckergehalt verringern und Schädlings- und Krankheitsanfälligkeit erhöhen (BAUMGÄRTEL *et al.* 2017, HOFFMANN 2005). Neben etablierten SI wird der Einsatz kombinierter SI (BARET ET AL. 2007, CILIA *et al.* 2014) getestet.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau und Feldmessungen

In einem zweijährigen Experiment, angelegt an der ETH Forschungsstation Eschikon, wurden Zuckerrüben der Sorte KWS Samuela untersucht. Im Versuch von 2016 wurden drei unterschiedliche N Düngermengen (0, 40, 80 kg N ha⁻¹) ausgebracht, und sechsfach wiederholt. Die Verteilung der N_{min}-Gehalte im Feld wurde vorgängig in 30 und 60 cm Bodentiefe erfasst. Während der Saison wurden parallel zu spektralen Messungen viele weitere Parameter erfasst (PFEIFER *et al.* 2016, siehe auch **Tabelle 1**).

Tabelle 1: Feldmessungen

Pflanzeigenschaft	Apparat
SPAD	Minolta SPAD Chlorophyll Meter
BBCH Stadium	Schätzung
Pflanzenhöhe	Zollstock
Blattfläche (LA)	ImageJ
Frischmasse (FW)	Balance
Trockenmasse (DW)	Balance
Chlorophyll Gehalt (Chl)	EnSpire + Berechnung
Stickstoff Konzentration (Nconc)	Probenanalyse mit Massenspektrometer

2.2 Spektrale Messungen

Die Erfassung der spektralen Reflektanz am Boden erfolgte wöchentlich mit einem ASD Fieldspec pro 4 (ASD Inc., Boulder, USA) zwischen Tag 57 und 107 nach der Saat (DAS). Die erhaltenen Spektren wurden nicht bodenkorrigiert und enthalten somit die Kombination aus Boden- und Pflanzenreflektanz. Der verwendete 3DR Quadrocopter (nachfolgend UAV) wurde mit einer Hyperspektralkamera (OXI VNIR 40, Gamaya, Lausanne, Schweiz) ausgestattet. Mehr Informationen in LIEBISCH *et al.* 2016 und PFEIFER *et al.* 2016.

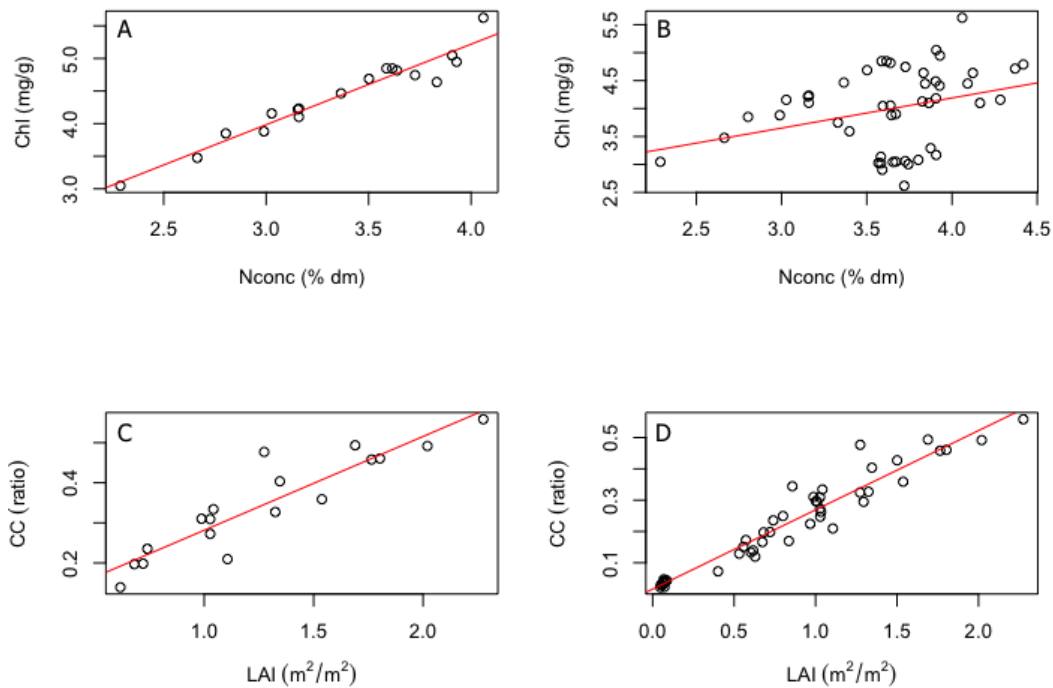


Abbildung 1: Beziehungen zwischen Chl, N_{conc} und CC, LAI. (A) Die lineare Beziehung zwischen N_{conc} und Chl für ein Messdatum ($R^2=0.93^{***}$, $p=4.76e-11$, $n=18$) und (B) für alle drei Messstermine ($R^2=0.08^*$, $p=0.027$, $n=54$). (C) Positiv lineare Korrelation für CC und LAI für ein Messdatum ($R^2=0.83^{***}$, $p=1.05e-7$, $n=18$) und (D) für alle drei Messstermine ($R^2=0.93^{***}$, $p=2.2e-16$, $n=54$).

2.3 Analyse der Spektralen Daten und Statistik

Die ASD-Hyperspektralmessungen wurden für jeden Plot mit Hilfe eines Reflektanzstandards (Spectralon) in Bezug auf das einfallende Sonnenlicht kalibriert. Die hyperspektralen Daten des UAV-Überfluges wurden zu einem georeferenzierten Orthophoto zusammengefügt und anschließend mit im Feld ausgelegten Reflektanzstandards kalibriert. Die Reflektanzen der untersuchten 18 Plots wurden mit Hilfe der Software ENVI 5.0 (Exelis Visual Information Solutions, Inc. USA) berechnet und exportiert. Aus beiden Datensätzen (ASD und UAV) wurde eine Vielzahl bekannter SIs berechnet (nachfolgend SI_{Ground} und SI_{UAV}) siehe **Tabelle 4**. Alle SIs wurden nachfolgend auf ihre Beziehungen zu den gemessenen Pflanzenparametern (Vgl. **Tabelle 1**) getestet. Statistische Tests wurden mit RStudio (R Core Team, 2014) durchgeführt.

3 Ergebnisse

Am Messdatum (23.06.16) zeigen Chl und N_{conc} eine hoch signifikante positive lineare Beziehung mit ($R^2 = 0.93^{***}$ **Abbildung 1a**). Die Signifikanz der Beziehung von Chl und N_{conc} sinkt wenn frühere Messzeitpunkte einbezogen werden (**Abbildung 1b**). Der Bedeckungsgrad (CC) und LAI korrelieren positiv linear sowohl für einen Messtag (**Abbil-**

Abbildung 1c) wie auch über alle drei hier untersuchten Messzeitpunkte hinweg (**Abbildung 1d)** hoch signifikant ($R^2 = 0.83^{***}$, bzw. 0.93^{***}). Der Zuckerertrag zeigt einen positiven linearen Zusammenhang zu N_{conc} wohingegen die totale aufgenommene Menge N in kg/ha ($N_{\text{total}} = N_{\text{conc}} \cdot \text{Trockenmasse}$) nur einen schwachen linearen Zusammenhang zeigt (**Abbildung 2**).

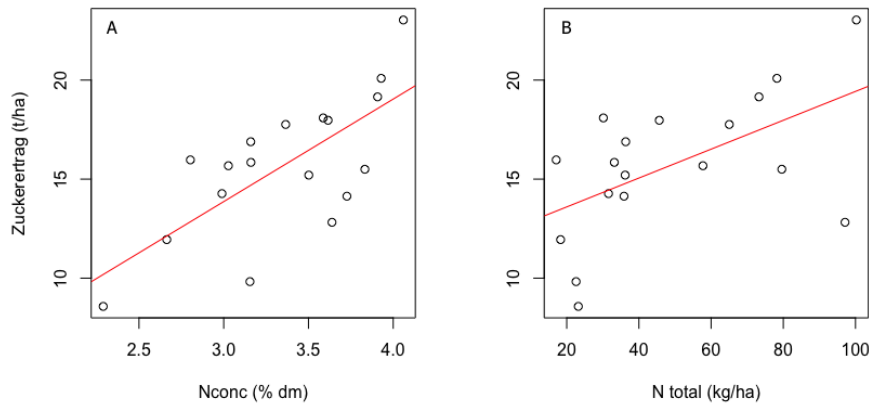


Abbildung 2: Beziehungen Zuckerertrag, N_{conc} , N_{total} . (a) Linearer Zusammenhang zwischen Zuckerertrag und N_{conc} ($R^2=0.47^{***}$, $p=0.001$, $n=18$). (b) Zusammenhang zwischen Zuckerertrag und N_{total} ($R^2=0.26^*$, $p=0.16$, $n=18$)

Die Korrelationen der SI und der Parameter CC, LAI, N_{conc} und Chl sind anhand der Korrelationskoeffizienten aufgelistet (**Tabelle 2**). Dargestellt sind die Korrelationen der SI_{Ground} über alle drei Messtermine, die SI_{Ground} und SI_{UAV} in Bezug auf den letzten Messtermin. Für die Parameter CC und LAI waren die SI_{Ground} Korrelationen der drei Messtermine generell höher als am letzten Termin. Für N_{conc} waren die Korrelationskoeffizienten der SI_{Ground} deutlich tiefer über drei Messtermine. Die Berechnungen der ausgewählten SI sind in **Tabelle 3** dargestellt. Die am besten linear korrelierenden SI_{Ground} sind in **Abbildung 3** abgebildet. Für die beiden Biomasse-Indikatoren CC und LAI sind die Simple Ratios 780/740 und 760/730 am besten korreliert (CC: $R^2 = 0.94^{***}$, LAI: $R^2 = 0.75^{***}$). Der SI LCI korreliert sowohl mit N_{conc} als auch mit Chl linear am besten (N_{conc} : $R^2 = 0.66^{***}$, Chl: $R^2 = 0.65^{***}$).

Bestehende kombinierte SI wie der DCNI oder MCARI/OSAVI rev korrelieren nicht signifikant mit N_{conc} oder N_{total} . Mit der Kombination aus dem besten SI als Biomasseindikatoren (CC, LAI) und dem besten SI der Konzentrationsparameter (N_{conc} , Chl) steigt die Güte der Beziehungen zu N_{conc} und N_{total} gegenüber einfachen SI leicht an (**Tabelle 4**). Die SI Kombinationen korrelierten signifikant mit N_{total} sowohl für SI_{Ground} als auch SI_{UAV} (**Abbildung 4**).

Tabelle 2: Top 3 der untersuchten SIs mit den zugehörigen Korrelationskoeffizienten

Spektrale Indices	CC		LAI		N _{conc}		Chi	
	SI	Korr	SI	Korr	SI	Korr	SI	Korr
S _{Ground} (über drei Messungen)	970/900	-0.976**	SAVI	0.939**	PMI	0.629**	MCAR1rev	0.873**
	NDVI nb	0.972**	GNDVI	0.938**	PRI	-0.433**	PRI norm	-0.859**
	OSAVI	0.972**	OSAVI	0.936**	CAI	0.362*	TCARI	0.857**
S _{Ground} (eine Messung)	780/740	0.970**	760/730	0.876**	LCI	0.826**	LCI	0.819**
	GNDVI	0.967**	780/740	0.874**	REIP	0.812**	PRI	0.799**
	NDRE	0.967**	NDWI	0.874**	NDR1	-0.806**	MTCI	0.794**
S _{UAV} (eine Messung)	PMI	0.967**	SBRI	-0.902**	TVI	0.797**	TVI	0.791**
	NIR	0.966**	HI	-0.885**	MCAR11	0.787**	MCAR11	0.779**
	CLSI	-0.965**	ALBEDO	0.885**	PMI	0.780**	PMI	0.756**

Tabelle 3: Berechnungen der SI. Aus Platzgründen sind die aufgeführten Studien nicht in der Referenzliste aufgeführt.

SI	Berechnung	Referenz	SI	Berechnung	Referenz
S _{Ground}	970/900	MISTELE&SCHMIDHALTER 2010b	PMI	(R520-R584)/(R520+R584)+R724	MAHLEIN et al. 2013
	780/740	MISTELE&SCHMIDHALTER 2010a	MCAR1 rev	((R750-R705)-0.2*(R750-R550))/(R750/R705)	WU et al. 2008
	760/730	MISTELE&SCHMIDHALTER 2010b	MTCI	(R750-R710)/(R710-R680)	DASH & CURRAN 2004
	NDRI	GELDER et al. 2009	TCARI	((R700-R670)-0.2*(R700-R550)*(R700/R670))	HIABOUDANE et al. 2002
	NDRE	BARNES et al. 2000, RODRIGUEZ et al. 2006, TILLING et al. 2007	LCI	(R850-R710)/(R850-R680)	DATT 1999
	NDVI nb	ROUSE JR et al. 1974	NDWI	(R860-R1240)/(R860+R1240)	CLAY et al. 2006
	GNDVI	GITELSON 1996	CAI	0.5*(R2020*100+R2220*100)-R2100*100	NAGLER et al. 2000
	OSAVI	(1+0.16)*(R800-R670)/(R800+R670+0.16)	REIP	700+40*((R670+R780)/(R740-R700))	GUYOT 1988
	SAVI	(1+L)*(Rn+Rr)/(Rn+Rr+L)	PRI	(R531+R570)/(R531+R570)	GAMON et al. 1992
S _{UAV}	PMI	(R522-R589)/(R522+R589)+R720	ALBEDO	(A_VIS+A_NIR)/2	
	NIR	Average NIR (700-1000)	TVI	0.5*(120*(R758-R563)-200*(R671-R553))	HABOUDANE et al. 2004
	CLSI	(R707-R577)/(R707+R577)+R733	MCAR11	1.2*(2.5*(R783-R671)-1.3*(R783-R553))	HABOUDANE et al. 2004
	SBRI	(R577-R510)/(R577+R510)+R707/2	HI	(R536-R680)/(R536+R680)-R707/2	MAHLEIN et al. 2013

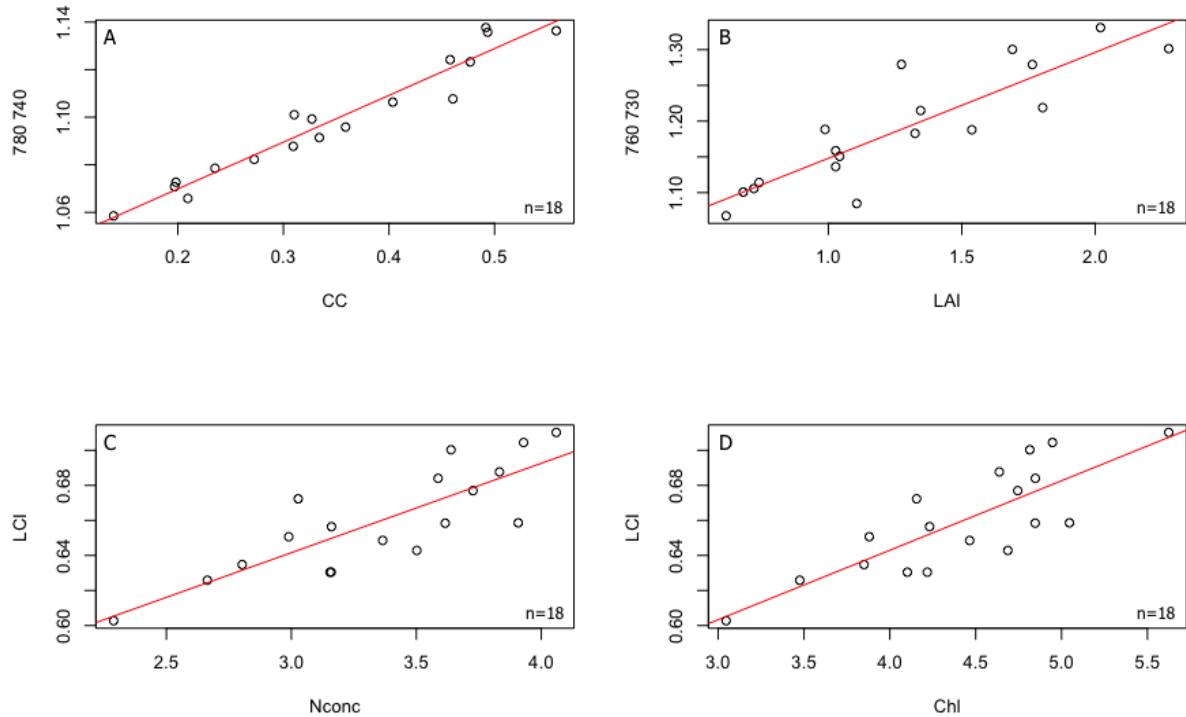


Abbildung 3: Beziehungen der besten SI_{Ground} mit Chl, N_{conc} und CC, LAI.
a: $CC=0.20*SI_{780_740}-1.03$, $R^2=0.94^{***}$, $p=2.76e-11$, $n=18$; **b:** $LAI=0.15*SI_{760_730}-1.00$, $R^2=0.75^{***}$, $p=1.90e-06$, $n=18$; **c:** $N_{conc}=0.05*SI_{LCI}-0.49$, $R^2=0.66^{***}$, $p=2.44e-5$, $n=18$; **d:** $Chl=0.04*SI_{LCI}-0.48$, $R^2=0.65^{***}$, $p=3.2e-5$, $n=18$

Tabelle 4: Vergleich einfacher SI gegenüber kombinierten SI
 Alle SI Berechnungen basieren auf einem Messtermin.

	SI	N_{conc}	N_{total}	Zcker- ertrag	Referenz
Single SI_{Ground}	NDVI nb	0.77	0.83	0.54	ROUSE JR <i>et al.</i> 1974
	NDRE	0.78	0.84	0.55	RODRIGUEZ <i>et al.</i> 2006, TILLING <i>et al.</i> 2007
	NDREI	0.77	0.83	0.56	GITELSON & MERZLYAK 1994
	780 740	0.77	0.84	0.51	MISTELE & SCHMIDHALTER 2010a
	760 730	0.78	0.85	0.55	MISTELE & SCHMIDHALTER 2010b
	REIP	0.81	0.79	0.57	GUYOT 1988
	SGR	-0.59	-0.65	-0.30	FUENTES <i>et al.</i> 2001
Kombinierte SI_{Ground}	DCNI	-0.01	-0.09	-0.09	CHEN <i>et al.</i> 2010
	MCARI OSAVI rev	-0.66	-0.73	-0.43	WU <i>et al.</i> 2008
	LCI * GNDVI	0.78	0.84	0.56	DATT 1999, GITELSON 1996
	LCI * 760 730	0.81	0.84	0.59	DATT 1999, MISTELE & SCHMIDHALTER 2010b
	LCI * NDVI nb	0.77	0.83	0.56	DATT 1999, ROUSE JR <i>et al.</i> 1974
	LCI * NDRE	0.78	0.84	0.56	DATT 1999, BARNES <i>et al.</i> 2000
	REIP * NDRE	0.78	0.84	0.55	GUYOT 1988, BARNES <i>et al.</i> 2000
	NDRI * NDRE	-0.79	-0.85	-0.57	GELDER <i>et al.</i> 2009, BARNES <i>et al.</i> 2000
NDRI^4 * NDRE	0.81	0.87	0.62	GELDER <i>et al.</i> 2009, BARNES <i>et al.</i> 2000	
Kombinierte SI_{UAV}	PMI * TVI	0.77	0.81	0.51	MAHLEIN <i>et al.</i> 2013, HABOUDANE <i>et al.</i> 2004
	SBRI * TVI	-0.76	-0.84	-0.51	MAHLEIN <i>et al.</i> 2013, HABOUDANE <i>et al.</i> 2004

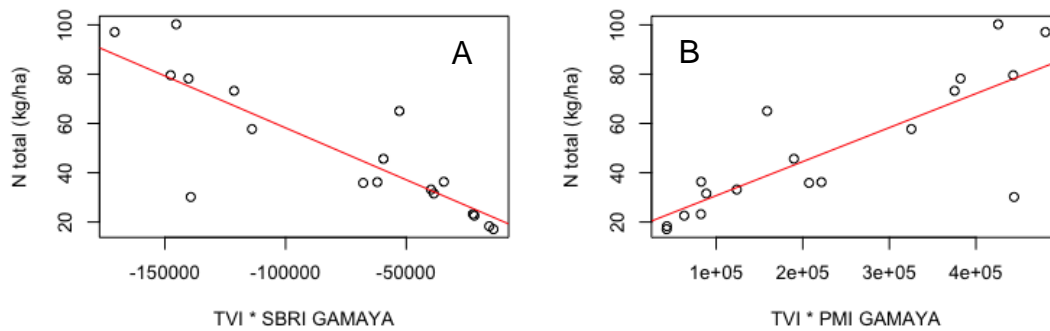


Abbildung 4: Beziehungen kombinierten SI_{UAV} mit N_{total} : Graph a: TVI * SBRI ($R^2=0.69^{***}$, $p=1.2e-5$, $n=18$), Graph b: TVI*PMI ($R^2=0.63^{***}$, $p=4.90e-05$ $n=18$).

4 Diskussion und Ausblick

Sowohl aus am Boden gemessenen Reflektanzen als auch aus bildgebenden Messungen aus der Luft können Rückschlüsse über die N Versorgung der Zuckerrübe gezogen werden. Der Vorteil der Verwendung eines UAV zur lokalen Fernerkundung liegt in der deutlich höheren räumlichen Durchsatzrate. Die spektralen N Indikatoren der am Markt erhältlichen Geräte zeigten zum Teil sehr hohe Korrelationen mit den Biomasseindikator CC und LAI. Für N_{conc} und Chl gab es SI mit deutlich höheren Korrelationskoeffizienten. Zur Abschätzung des N Bedarfs in der Zuckerrübe eignen sich einfache SI und kombinierte SI. Die SI-Kombination ermöglicht wahrscheinlich stabilere Interpretationen, da Schätzungen der Biomasse und N-Blattversorgung einzeln berücksichtigt werden. Mit der Erweiterung kombinierter SI auf komplexere funktionsbasierte Ansätze und der Interpretation anhand von Modell oder empirisch erworbenen Optimalwerten erwarten wir eine noch stabilere N Düngeempfehlung. Diese Ansätze werden in laufenden Analysen weiterverfolgt.

Danksagung: Wir danken Moritz Köhle und Gregor Perich für ihre hilfreiche Unterstützung im Rahmen ihrer Bachelorarbeiten. Martin und Andreas Bertschi, sowie Ronald Vögeli vom Strickhof möchten wir für die Möglichkeit der Versuchsdurchführung und das Feldmanagement danken. Dieses Projekt ist gefördert durch das European Union's Horizon 2020 research and innovation Program unter dem Grant 644227 und vom Swiss State Secretariat for Education, Research and Innovation (SERI) unter 15.0029.

Literaturverzeichnis

BARET F., HOULÈS V., GUÉRIF M. (2007): Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: the case of nitrogen management. *Journal of Experimental Botany* 58 (4): 869-880.

- BARNES E., CLARKE T., RICHARDS S., COLAIZZI P.D., HABERLAND J., KOSTRZEWSKI M., WALLER P., ET AL. (2000):** Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture.
- BAUMGÄRTEL G., ALBERT E., WEBER D. (2017):** Gute fachliche Praxis der Stickstoffdüngung. AID Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz. 10. Aufl., Bonn.
- CHEN P., HABOUDANE D., TREMBLAY N., WANG J., VIGNEAULT P., LI B. (2010):** New Spectral Indicator Assessing the Efficiency of Crop Nitrogen Treatment in Corn and Wheat. Remote Sensing of Environment 114 (9).
- CILIA C., PANIGADA C., ROSSINI M., MERONI M., Busetto L., AMADUCCI S., BOSCHETTI M., PICCHI V., COLOMBO R. (2014):** Nitrogen Status Assessment for Variable Rate Fertilization in Maize through Hyperspectral Imagery. Remote Sensing 6 (4): 6549-6565.
- CLAY D.E., KIM K.I., CHANG J., CLAY S.A., DALSTED K. (2006):** Characterizing Water and Nitrogen Stress in Corn Using Remote Sensing. Agronomy Journal 98 (3): 579-87.
- CONSTANTIN D., REHAK M., AKHTMAN Y., LIEBISCH F. (2015):** Detection of crop properties by means of hyperspectral remote sensing from a micro UAV. 21. Workshop Computer Bildanalyse in der Landwirtschaft und 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (AUS) in der Landwirtschaft. 6. Und 7. Mai 2015, Braunschweig, Deutschland.
- DASH J., CURRAN P.J. (2004):** The MERIS Terrestrial Chlorophyll Index. International Journal of Remote Sensing 25 (23): 5403-13.
- DATT B. (1999):** A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves. Journal of Plant Physiology 154 (1).
- FUENTES D.A., GAMON J.A., QIU H.L., SIMS D.A., ROBERTS D.A. (2001):** Mapping Canadian Boreal Forest Vegetation Using Pigment and Water Absorption Features Derived from the AVIRIS Sensor. Journal of Geophysical Research 106 (D24): 33565.
- GAMON J.A., PEÑUALES J., FIELD C.B. (1992):** A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. Remote Sensing of Environment 41 (1): 35-44.
- GELDER B.K., KALEITA A.L., CRUSE R.M. (2009):** Estimating Mean Field Residue Cover on Mid-western Soils Using Satellite Imagery. Agronomy Journal 101 (3): 635-43.
- GITELSON A.A., MERZLYAK M.N. (1994):** Quantitative Estimation of Chlorophyll-a Using Reflectance Spectra: Experiments with Autumn Chestnut and Maple Leaves. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 22 (3): 247-52.
- GITELSON A.A., MERZLYAK M.N. (1996):** Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll. Journal of Plant Physiology 148 (3-4): 494-500.
- GUYOT G., BARET F. (1988):** Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'état des couverts vegetaux. In Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, 18-22. Jan, Aussois, France: 279-286.
- HABOUDANE D., MILLER J.R., TREMBLAY N., ZARCO-TEJADA P.J., DEXTRAZE L. (2002):** Integrated Narrow-Band Vegetation Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture. Remote Sensing of Environment 81 (2-3): 416-26.
- HABOUDANE D., MILLER J.R., PATTEY E., ZARCO-TEJADA P.J., STRACHAN I.B. (2004):** Hyperspectral Vegetation Indices and Novel Algorithms for Predicting Green LAI of Crop Canopies: Modeling and Validation in the Context of Precision Agriculture. Remote Sensing of Environment 90 (3): 337-52.

- HOFFMANN C. (2005):** Changes in N Composition of Sugar Beet Varieties in Response to Increasing N Supply. *Agronomy & Crop Science* 191: 138-145.
- LIEBISCH F., PFEIFER J., KHANNA R., LOTTES P., STACHNISS C., FALCK T., SANDER S., SIEGWART R., WALTER A., GALCERAN E. (2016):** Flourish – A robotic approach for automation in crop management. 22. Workshop Computer Bildanalyse und Unbemannte autonom fliegende Systeme in der Landwirtschaft. 21. April 2016, Wernigerode, Germany.
- 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 Sensing of Environment* 128: 21-30.
- MISTELE B., SCHMIDHALTER U. (2008):** Spectral measurements of the total aerial N and biomass dry weight in maize using a quadrilateral-view optic. *Field Crops Res.* 106: 94-103.
- MISTELE B., SCHMIDHALTER U. (2010a):** Tractor-Based Quadrilateral Spectral Reflectance Measurements to Detect Biomass and Total Aerial Nitrogen in Winter Wheat. *Agronomy Journal* 102 (2): 499-506.
- MISTELE B., SCHMIDHALTER U. (2010b):** A Comparison of Spectral Reflectance and Laser-Induced Chlorophyll Fluorescence Measurements to Detect Differences in Aerial Dry Weight and Nitrogen Uptake. 10th International Conference in Precision Agriculture. Denver, Colorado, July 18-21.
- NAGLER P.L., DAUGHTRY C.S.T., GOWARD S.N. (2000):** Plant Litter and Soil Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 71 (2): 207-15.
- PFEIFER J., KHANNA R., CONSTANTIN D., POPOVIC M., GALCERAN E., KIRCHGESSNER N., WALTER A., SIEGWART R., LIEBISCH F. (2016):** Towards automatic UAV data interpretation for precision farming. CIGR-AgEng conference. 26-29. Juni 2016, Aarhus, Dänemark.
- RODRIGUEZ D., FITZGERALD G., BELFORD R., CHRISTENSEN L. (2006):** Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-biophysiological concepts. *Aust. J. Agric. Res.* 57: 781-789.
- RONDEAUX G., STEVEN M., BARET F. (1996):** Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55: 95-107.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A., DEERING D.W., HARLAN J.C. (1974):** Monitoring the Vernal Advancements and Retro Gradation of Natural Vegetation. NASA/GSFC Final Report, Greenbelt, MD, USA: 371.
- TILLING A., O'LEARY G., FERWERDA J., JONES S., FITZGERALD G., RODRIGUEZ D., BELFORD R. (2007):** Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Res.* 104: 77-84.
- TREMBLAY N., WANG Z., MA B., BELEC C., VIGNEAULT P. (2009):** A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application 10: 145-161.
- WHELAN B. (2015):** Proximal Crop Reflectance Sensors – A guide to their capabilities and uses. Grains Research and Development Corporation and University of Sydney.
- WU C., NIU Z., TANG Q., HUANG W. (2008):** Estimating Chlorophyll Content from Hyperspectral Vegetation Indices : Modeling and Validation. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 (8-9): 1230-41.

UAV-gestützte Reflexionsmessungen zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe des NDVI am Beispiel eines Trockenstressversuches

UAV-assisted reflectance measurements for the estimation of breeding-relevant parameters with the help of NDVI by the example of a drought stress experiment

Tina Langkamp¹, Martin Kraft¹, Heiko Neeland¹, Katja Matschiner², Lorenz Kottmann³, Susanne Schroetter³, Siegfried Schittenhelm³

¹ Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

² Strube Research GmbH & Co. KG, Sölingen

³ Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig
E-Mail: tina.langkamp@thuenen.de

Zusammenfassung: Einen innovativen Ansatz zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe des NDVI im Hochdurchsatz bieten fernerkundliche Messungen mit unbemannten Luftfahrzeugen (UAV). Im Rahmen des Projektes „Phaenokopter“ (BLE-Verbundprojekt) wurde mittels einer an einem UAV montierten Multispektralkamera die Reflexion von 16 Winterweizengenotypen unter kontrolliertem Trockenstress in Rain-out Shelters sowie unter optimaler Bewässerung erfasst. Der NDVI wurde mit Ertragsdaten und physiologischen Pflanzenparametern in Beziehung gesetzt. Zwischen $NDVI_{Mittel}$ (4 Messflüge) und Kornertrag bestand eine signifikante Korrelation ($R^2 = 0,46^{**}$). Besser korrelierte jedoch der $NDVI_{Mittel}$ mit dem Strohertrag ($R^2 = 0,69^{***}$) und der Biomasse ($R^2 = 0,70^{***}$). Auch konnten mit Hilfe des NDVI die Abreife und der LAI abgeschätzt werden.

Deskriptoren: Winterweizen, UAV, NDVI, Kornertrag, Abreife

Abstract: An innovative approach to estimate breeding-relevant parameters with the help of NDVI in high-throughput phenotyping is provided by remote measurements with unmanned aircraft vehicles (UAV). Within the project "Phaenokopter" (joint BLE project) the reflectance of 16 winter wheat genotypes under controlled drought stress in rain-out shelters as well as under optimal irrigation was recorded by a multi-spectral camera mounted on an UAV. The NDVI was correlated with yield data and physiological plant parameters. A significant correlation was found between $NDVI_{mean}$ (4 measurement flights) and grain yield ($R^2 = 0.46^{**}$). However, the $NDVI_{mean}$ correlated better with the straw yield ($R^2 = 0.69^{***}$) and the biomass ($R^2 = 0.70^{***}$). The maturation and the LAI could also be estimated using the NDVI.

Keywords: winter wheat, UAV, NDVI, grain yield, maturation

1 Einleitung

Der Einsatz von UAV in der Landwirtschaft findet zunehmend Interesse. Trotz der sich rasch entwickelnden Technologie und des immer größeren Marktangebotes können bisher nur wenige landwirtschaftliche Fragestellungen im fernerkundlichen Bereich beantwortet werden. Besonders Pflanzenzüchter zeigen ein großes Interesse an der Fernerkundung, da sich dadurch die Bonitur- und Messarbeiten in einem Zuchtgarten erheblich beschleunigen lassen und Zuchtgärten weniger betreten werden müssen, was eine Beschädigung der Parzellen (vor allem bei Lagerweizen) mindert. Die Bildanalyse und die Interpretation der Daten stehen jedoch bislang im Schatten der Technik. Das Verbundprojekt „Phaenokopter“ ist eine groß angelegte Versuchsreihe zum Thema: Fernerkundliche Beurteilung der Trocken- und Hitzetoleranz von Weizengenotypen auf Selektionsstandorten mit begleitenden Untersuchungen zu Durchwurzelungstiefe, Wurzelmorphologie und Wasserhaushalt. Ein Teilziel dieses Verbundprojektes ist die Analyse von umfangreichem Bildmaterial und die Interpretation dieser Daten zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe fernerkundlicher Vegetationsindizes. In der vorliegenden Arbeit wird die Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter mit Hilfe des NDVI (Normalisierter Differenz-Vegetationsindex) am Beispiel eines Trockenstressversuches in Braunschweig vorgestellt.

2 Material und Methoden

Ein Teilbereich des Verbundprojektes „Phaenokopter“ schließt eine Rain-out Shelter Anlage mit kontrollierten Trockenstressbedingungen und eine optimal bewässerte Kontrolle mit ein. Während in den Rain-out Shelters eine Wassergabe erst bei < 20% der nutzbaren Feldkapazität (nFK) erfolgte, wurde die Bodenfeuchte in der Kontrollvariante bei > 70% nFK gehalten. In dieser Versuchsanlage wurden 16 Winterweizengenotypen aus sechs Materialgruppen während der Vegetationsperiode 2015/2016 in vierfacher Wiederholung angebaut und durch phänologische, physiologische und agronomische Merkmale genauer charakterisiert. Unter anderem wurden folgende Merkmale erfasst: Blattflächenindex (LAI mittels „SunScan“-System) und Chlorophyllgehalt, Blühbeginn und -dauer, BBCH Stadium 89 (Datum Vollreife), Korn- und Strohertrag sowie Biomasseertrag (Summe aus Korn- und Strohertrag). Winterweizenmaterialgruppen, die verwendet wurden, sind Hybriden, Einzelähren- und Bestandstypen, Genotypen aus dem europäischen Ausland, sowie Genotypen mit einer langen und kurzen Wuchshöhe.

Parallel zu der Erfassung phänologischer, physiologischer und agronomischer Merkmale erfolgten im Jahr 2016 an vier Tagen während der Vegetationszeit Messflüge zwischen dem Ende der Fahnenblattentwicklung und der Vollreife (12.05, 26.05., 24.06. und 05.07.), an denen die komplette Versuchsfläche mit dem ThünoCopter überflogen wurde. Der ThünoCopter ist eine Eigenentwicklung auf Basis von MikroKopter Okto XL, an dem ein Multispektralkamerasystem bestehend aus vier einzelnen Kameras (D3, VRmagic GmbH, Mannheim, Deutschland) angebracht wurde, die zeitgleich auslösen.

Ein ähnliches Modell wurde in den Untersuchungen von GEIPEL *et al.* (2016) verwendet. Neben einer RGB-Kamera wurden noch drei mit schmalen Wellenlängenbandfiltern von 650 nm, 850 nm und 970 nm ausgestattete Kameras (Edmund Optics GmbH, Karlsruhe, Deutschland) eingesetzt. Um die anschließende Bildanalyse zu erleichtern, wurden die Versuchspartzellen in den Aufnahmen mit Hilfe von Styroporscheiben, die im Versuch platziert waren, lokalisiert und an ein Koordinatensystem angepasst. Sehr hilfreich ist diese Methode, wenn in den Aufnahmen keine Feldkanten oder –seiten zur Orientierung vorhanden sind. Mit der am Thünen-Institut entwickelten Bildanalyse-Software wird in mehreren Schritten jede einzelne Parzelle lokalisiert und der Grauwert der Kernparzelle als Median ausgegeben ($W_{p,i}$) (**Abbildung 1**). Die Styroporscheiben dienen zudem als Weißabgleich und zusammen mit dem Grauwert des Styropors (S_i) und dem Reflexionsgrad im entsprechenden Wellenlängenband (RS_i) erfolgt die Berechnung des Reflexionsgrads der Parzelle ($R_{p,i}$) (Gl. 1). Aus den erfassten multispektralen Bildern wurde für diese Arbeit der Normalisierte Differenz-Vegetationsindex (NDVI) bestimmt. Dieser berechnet sich aus der Reflexion der Pflanzen im Bereich von 650 und 850 nm (Gl. 2) (ROUSE 1974) und wird im Anschluss mit Ertragsdaten und physiologischen Pflanzenparametern in Beziehung gesetzt. Der NDVI wird entweder angegeben mit dem Mittelwert aller vier Messflüge als $NDVI_{Mittel}$ oder für einen speziellen Messflug als $NDVI_{Datum}$.

$$R_{p,i} = \frac{W_{p,i}}{S_i * RS_i} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$NDVI = \frac{R_{p,850nm} - R_{p,650nm}}{R_{p,850nm} + R_{p,650nm}} \quad (\text{Gl. 2})$$

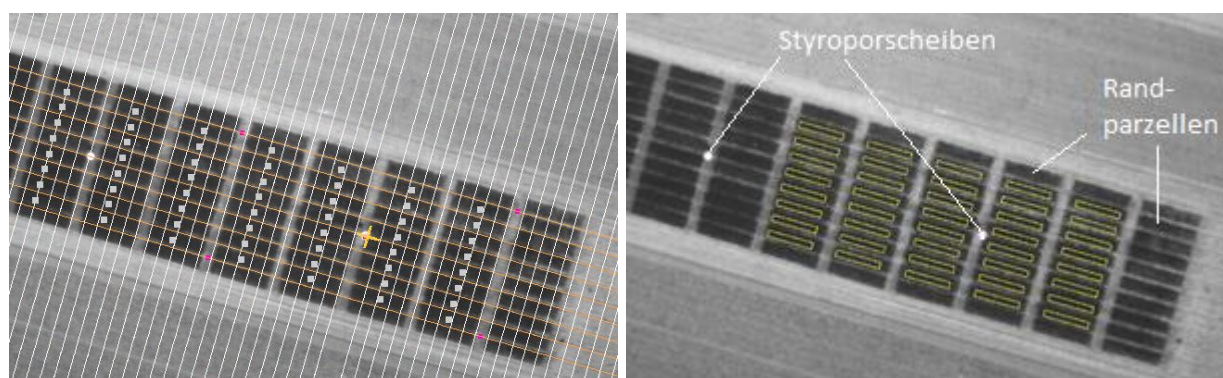


Abbildung 1: Lokalisierung der Parzellen mit Hilfe der Bildanalyse einer Aufnahme bei 650 nm (links) und Kernparzellen, deren Grauwerte bestimmt werden (rechts).

3 Ergebnisse

Die ermittelten Werte für den NDVI an vier Messflügen vom Ende der Fahnenblattentwicklung bis zur Reife über die Genotypen gemittelt gehen aus der **Abbildung 2** (links) hervor. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Genotypen nach dem zweiten Messflug unter Trockenstress signifikant geringere NDVI Werte aufwiesen als die Genotypen un-

ter optimaler Bewässerung. Ebenso ist zu erkennen, dass die Kurve der Genotypen unter Trockenstress nach dem zweiten Messflug schneller abfällt, als die der Genotypen unter optimaler Bewässerung, was die frühere Abreife unter Trockenstress anzeigte. Des Weiteren zeigt die **Abbildung 2** (rechts), dass ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Bewässerungsbedingungen vorlag, wenn über alle Messflüge der Index gemittelt wird ($NDVI_{Mittel}$). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird nun geprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen den erfassten NDVI Werten als Einzel- oder im Mittelwert und Pflanzenparametern zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter gab.

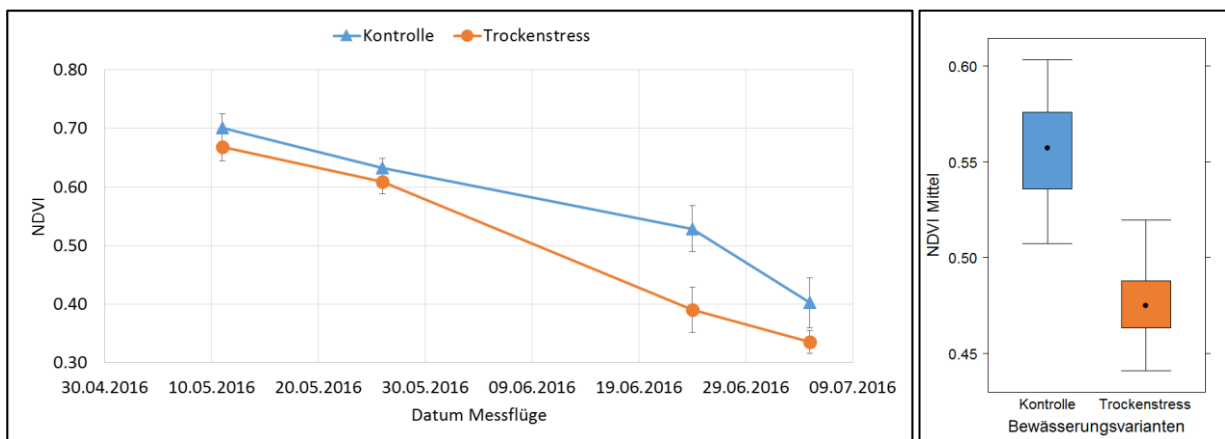


Abbildung 2: NDVI unter Trockenstress und in der Kontrolle an vier Messflügen in der Vegetationszeit vom Ende der Fahnenblattentwicklung bis zur Reife über die Genotypen gemittelt (links) und $NDVI_{Mittel}$ über die vier Messflüge gemittelt (Angabe: Minimum, 1. Quartil, Median, 3. Quartil, Maximum; rechts).

Der erste Parameter, der mit dem $NDVI_{Mittel}$ in Beziehung gesetzt wurde, war der Korn-ertrag. Erwartungsgemäß lag unter Trockenstress ein signifikant geringerer Korn-ertrag vor als unter optimaler Bewässerung. Innerhalb der Behandlungen differenzierten die Genotypen sowohl im Korn-ertrag als auch im $NDVI_{Mittel}$ so, dass ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen den beiden Parametern zu erkennen war. **Abbildung 3** (links) zeigt, dass zwischen dem $NDVI_{Mittel}$ und dem Korn-ertrag sowohl unter Trocken-stressbedingungen ($R^2 = 0,38 *$) als auch unter optimal bewässerten Bedingungen ($R^2 = 0,46 **$) ein signifikanter Zusammenhang bestand. Eine ebenso gute Korrelation wurde auch zwischen dem $NDVI_{24.06.2016}$ und dem Korn-ertrag unter beiden Bewässe-rungsbedingungen festgestellt (nicht dargestellt). Zu diesem Zeitpunkt begann die Ab-reife und die Genotypen begannen sich zu differenzieren.

Eine bessere Korrelation wurde jedoch zwischen dem $NDVI_{Mittel}$ und dem Strohertrag (**Abbildung 3**, rechts) bzw. dem Biomasseertrag unter beiden Bewässerungsbedingun-gen ermittelt (**Abbildung 4**, links). Dies ist nicht verwunderlich, da der NDVI ein auf der Biomasse basierender Vegetationsindex ist.

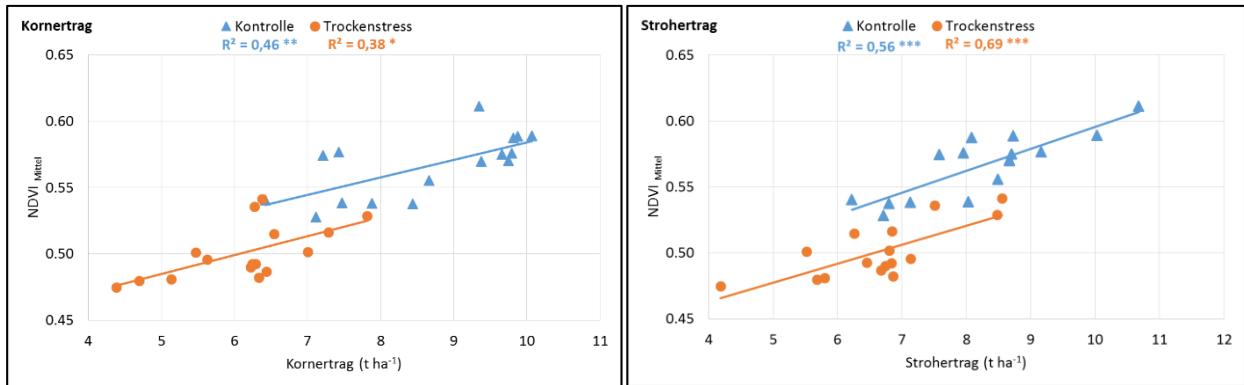


Abbildung 3: Korrelation von $NDVI_{Mittel}$ mit Kornertrag (links) und Strohertrag (rechts) der 16 Genotypen im Rain-out Shelter Versuch unter Trockenstress und Kontrolle. *, **, *** signifikant für $p < 0,05$, $p < 0,01$ und $p < 0,001$.

Ein weiterer Parameter, der untersucht wurde, war die Blühdauer in Tagen. Die Blühdauer der Genotypen unter Trockenstress unterschied sich nicht signifikant von der Blühdauer der Genotypen unter optimaler Bewässerung. Demzufolge beeinflussten die Bewässerungsbedingungen die Blühdauer nicht. Es zeigte sich jedoch, dass zwischen dem $NDVI_{Mittel}$ und der Blühdauer der Genotypen sowohl unter Trockenstress ($R^2 = 0,37 *$) als auch unter optimaler Bewässerung ($R^2 = 0,42 **$) ein signifikanter negativer Zusammenhang vorlag (**Abbildung 4**, rechts). Ein hoher $NDVI_{Mittel}$ wies somit auf eine kurze Blühdauer hin. Leider konnte nicht statistisch abgesichert werden, ob eine kurze Blühdauer auch auf einen hohen Kornertrag hindeutete.

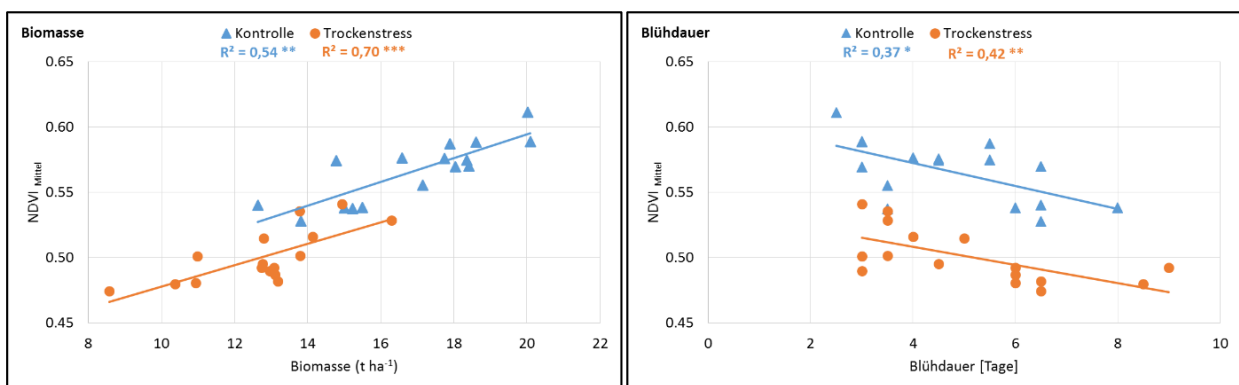


Abbildung 4: Korrelation von $NDVI_{Mittel}$ mit Biomasseertrag (links) und Blühdauer (rechts) der 16 Genotypen im Rain-out Shelter Versuch unter Trockenstress und Kontrolle. *, **, *** Signifikant für $p < 0,05$, $p < 0,01$ und $p < 0,001$.

Der $NDVI_{Mittel}$ konnte jedoch nicht bei allen Pflanzenparametern herangezogen werden. Physiologische Pflanzenparameter, die nicht-invasiv in der Vegetationszeit an einem bestimmten Tag erfasst wurden, konnten besser mit dem NDVI des entsprechenden Entwicklungsstadiums beschrieben werden als mit dem $NDVI_{Mittel}$ oder dem NDVI eines

andern Entwicklungsstadiums. Besonders deutlich wurde dies bei der Betrachtung des Blattflächenindex (LAI). **Tabelle 1** zeigt den Zusammenhang zwischen dem LAI an drei Messtagen und den NDVI von drei Messflügen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die besten Zusammenhänge dann vorlagen, wenn LAI und NDVI zum selben Entwicklungsstadium erfasst wurden. Mit einer Ausnahme unter optimaler Bewässerung (LAI_{25.05.2016}) war dieser Effekt bei beiden Bewässerungsbedingungen zu erkennen.

Tabelle 2: Bestimmtheitsmaß zwischen Blattflächenindex (LAI) und NDVI an verschiedenen Messflügen unter Trockenstress und unter optimaler Bewässerung. *, **, *** signifikant für $p < 0,05$, $p < 0,01$ und $p < 0,001$, ns = nicht signifikant.

optimale Bewässerung			unter Trockenstress		
LAI	NDVI	R ²	LAI	NDVI	R ²
09.05.2016	11.05.2016	0.72 ***	09.05.2016	11.05.2016	0.44 **
	26.05.2016	0.50 **		26.05.2016	0.24 ns
	24.06.2016	0.0004 ns		24.06.2016	0.04 ns
25.05.2016	11.05.2016	0.88 ***	25.05.2016	11.05.2016	0.47 **
	26.05.2016	0.74 ***		26.05.2016	0.66 ***
	24.06.2016	0.02 ns		24.06.2016	0.21 ns
21.06.2016	11.05.2016	0.38 *	21.06.2016	11.05.2016	0.11 ns
	26.05.2016	0.35 *		26.05.2016	0.21 ns
	24.06.2016	0.60 ***		24.06.2016	0.62 ***
LAI _{Mittel}	NDVI _{Mittel}	0,66 ***	LAI _{Mittel}	NDVI _{Mittel}	0,43 **

Dieser Effekt wurde ebenfalls bei der Betrachtung der Abreife deutlich. **Abbildung 5** (rechts) zeigt einen Zusammenhang zwischen dem Tag des BBCH Stadiums 89 und dem NDVI_{24.06.2016} (DOY 176) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,72$ *** der Genotypen unter Trockensstress. Würde der Messflug vom 05.07.2016 (DOY 187) verwendet werden, läge der Zusammenhang nur noch bei $R^2 = 0,31$ *ns (nicht dargestellt). Auch wenn dieser Messflug in der Mitte der Abreife lag, eignete sich ein Messflug zu Beginn der Abreife, wenn sich die Genotypen langsam differenzieren, besser zur Vorhersage der Abreife als ein Messflug in der Abreife. Ebenso verhielt es sich bei den Genotypen unter optimaler Bewässerung. Hier erfolgte die Abreife später und somit eignete sich auch ein späterer Messflug, um einen signifikanten Zusammenhang ($R^2 = 0,70$ ***) erkennen zu lassen (**Abbildung 5**, links). Aber auch hier lag der Messflug in einem Zeitraum vor Erreichen von BBCH Stadium 89. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass fernerkundlich mit Hilfe des NDVI eine relative Abschätzung des Termins für BBCH 89 um fast 10 Tage vor dem eigentlichen Erreichen dieses Stadiums möglich ist. Auffällig war auch, dass die SO/SW-europäischen Genotypen in beiden Bewässerungsbedingungen früher das BBCH Stadium 89 erreichten und einen geringen NDVI aufwiesen als die Genotypen aus Deutschland.

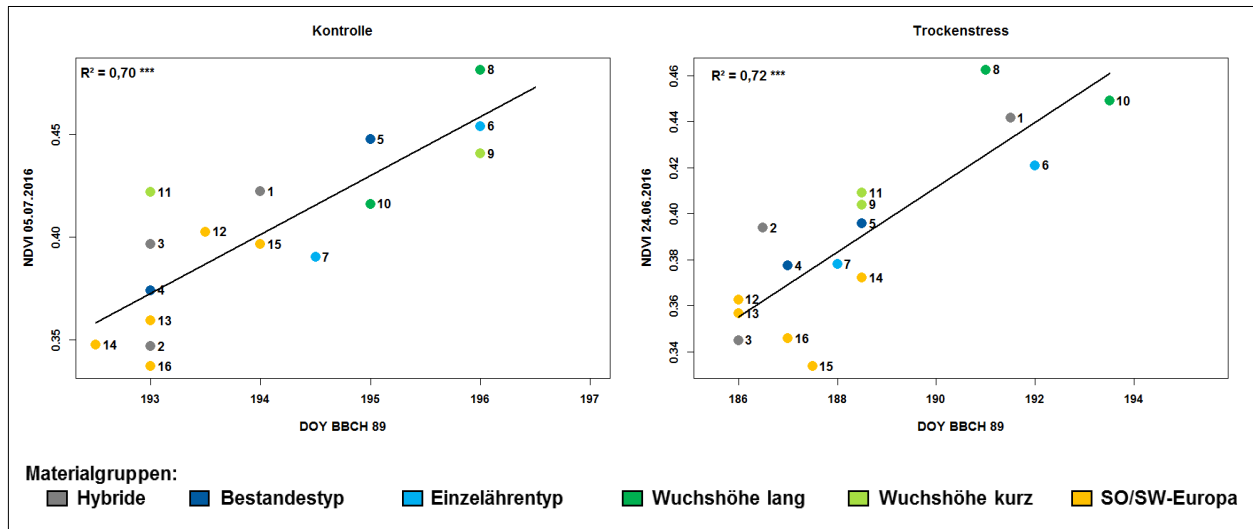


Abbildung 5: Korrelation zwischen $NDVI_{05.07.2016}$ und BBCH Stadiums 89 in der Kontrolle (links) und zwischen $NDVI_{24.06.2016}$ und dem BBCH Stadiums 89 in der Variante Trockenstress (rechts) der 16 Genotypen im Rain-out Shelter Versuch. *** Signifikant für $p < 0,001$.

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen das Potenzial fernerkundlicher Messungen mit Hilfe unbemannter Luftfahrzeuge (UAV) während der Vegetationszeit zur Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter im Hochdurchsatz am Beispiel von Genotypen unter Trockenstress und unter optimal bewässerten Bedingungen.

Die Reaktion auf Trockenstress kann sowohl von anatomisch-morphologischer als auch von physiologisch-biochemischer Art sein (BRUNOLD *et al.* 1996), entscheidend sind jedoch die Intensität, die Dauer und der Zeitpunkt der Einwirkung des Stressors (LEVITT 1980). Ein milder Stress kann förderlich wirken (gedrungener Wuchs), über einen längeren Zeitraum kann der Stress hingegen irreversible Auswirkungen haben oder zum Tod der Pflanzen führen (CHAVES *et al.* 2002). Trotz des Wissens über eindeutige Reaktionen auf Trockenstress und über die Methoden zur Identifizierung von Trockenstress mit Hilfe von wasserrelevanten Reflexionsindizes (CLEVERS *et al.* 2008, FENSHOLT & SANDHOLT 2003, GAO 1996, GUTIERREZ *et al.* 2010, HUNT JR & ROCK 1989, SIMS & GAMON 2003), gibt es bislang wenig Literatur darüber, ob Trockenstress auch über den relativ einfach zu ermittelnden NDVI erfasst werden kann. Bereiche, in denen der NDVI erfolgreich zur Identifizierung von Stressoren eingesetzt wurde, sind unter anderem Stickstoffdefizit (CLAY *et al.* 2006, GEIPEL *et al.* 2016) und Salzbelastung (PEÑUELAS *et al.* 1997) oder zur Ermittlung des Bedeckungsgrades (PUREVDORJ *et al.* 1998). Hintergrund dafür ist, dass der NDVI aus der Bestandsreflexion des roten und nah-infraroten Bereiches berechnet wird (ROUSE 1974). Stressoren, die die Reflexion eines Pflanzenbestandes in diesen Bereichen beeinflussen, wie durch einen geminderten Aufbau oder schnellen Abbau von Chlorophyll, beeinflussen damit auch gleichzeitig den NDVI. Trockenstress führt ebenso wie Stickstoffmangel zu einem Abbau von Pigmenten (CHAVES

et al. 2003). Es liegt daher nahe, dass sich Trockenstress-relevante Pflanzenparameter mit Hilfe des NDVI identifizieren lassen.

Den Einfluss von Trockenstress auf NDVI, Ertrags- und Pflanzenparameter bestätigen auch die vorliegenden Ergebnisse. Erwartungsgemäß zeigten Genotypen unter Trockenstress einen signifikant niedrigeren Kornertrag, Strohertrag und Biomasseertrag als unter optimaler Bewässerung. Zudem waren deutliche genotypische Effekte unter den beiden Bedingungen zu erkennen. Deutlich wird dies mit Hilfe des $NDVI_{Mittel}$. Signifikante Korrelationen lagen zwischen $NDVI_{Mittel}$ und Korn- und Strohertrag, sowie zwischen $NDVI_{Mittel}$ und Biomasseertrag und Blühdauer vor. Des Weiteren wurde deutlich, dass eine höhere Korrelation zu erwarten ist, wenn LAI und NDVI zu denselben Entwicklungsstadien aufgenommen werden. Dies bestätigt die Annahme, dass Ertragsparameter besser mit dem $NDVI_{Mittel}$ und physiologische Parameter besser mit dem NDVI zum selben Entwicklungsstadium zu vergleichen sind. Ebenso korreliert der NDVI zu Beginn der Abreife besser mit dem BBCH Stadium 89 als ein während der Abreife ermittelter NDVI. Die Erfassung des BBCH Stadiums ist sehr zeitaufwändig, da an mehreren Tagen die Zuchtgärten betreten werden müssen, und dadurch eine Beschädigung der Parzellen bei Vorliegen von Lager vorprogrammiert ist. Es wäre daher eine große Erleichterung für den Züchter, dieses Stadium fernerkundlich zu erfassen. Dass dies in Ansätzen möglich ist, zeigte diese vorliegende Untersuchung. Durch die Erfassung des BBCH Stadiums 89 wurde ersichtlich, dass Genotypen unter Trockenstress bis zu sieben Tagen früher mit der Abreife beginnen als Genotypen unter optimaler Bewässerung. Dies ist jedoch auch schon aus dem Verlauf des NDVI während der Vegetationszeit ersichtlich. Es zeigte sich deutlich, dass der NDVI der Genotypen unter Trockenstress ab Ende Juni stärker abfiel als der NDVI der Genotypen unter optimaler Bewässerung und am dritten Messflug war dieser Unterschied signifikant. Häufigere Messflüge zwischen dem zweiten und dritten Messflug hätten mit großer Wahrscheinlichkeit einen exakteren Beginn der Abreife hervorsagen können.

Fazit: Fernerkundlich gemessene Vegetationsindizes, wie der NDVI zu verschiedenen Entwicklungsstadien, ermöglichen die Berechnung von Ertragserwartungen und die Abschätzung züchterisch relevanter Bestandsparameter im Hochdurchsatz von Genotypen und können die züchterische Bearbeitung effizienter gestalten.

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

Literaturverzeichnis

- BRUNOLD C., RÜEGSEGER A. & BRÄNDLE R. (1996):** Stress bei Pflanzen. P. Haupt, Bern.
- CHAVES M.M., MAROCO J. P., PEREIRA J.S. (2003):** Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30, (3), 239–264.
- CHAVES M.M., PEREIRA J.S., MAROCO J., RODRIGUES M.L., RICARDO C.P.P., L., O.M., CARVALHO I., FARIA T., PINHEIRO C. (2002):** How Plants Cope with Water Stress in the Field. *Photosynthesis and Growth. Annals of Botany*, 89, (7), 907-916.
- CLAY D.E., KIM K.-I., CHANG J., CLAY S.A., DALSTED K. (2006):** Characterizing Water and Nitrogen Stress in Corn Using Remote Sensing. *Agronomy Journal*, 98, 579-587.
- CLEVERS J.G.P.W., KOOISTRA L., SCHAEPMAN M.E. (2008):** Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10, (3), 388-397.
- FENSHOLT R., SANDHOLT I. (2003):** Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87, (1), 111-121.
- GAO B.-C. (1996):** NDWI - A Normalized Difference Water Comment for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
- GEIPEL J., LINK J., WIRWAHN J., CLAUPEIN W. (2016):** A Programmable Aerial Multispectral Camera System for In-Season Crop Biomass and Nitrogen Content Estimation. *Agriculture*, 6, (1), 4.
- GUTIERREZ M., REYNOLDS M.P., KLATT A.R. (2010):** Association of water spectral indices with plant and soil water relations in contrasting wheat genotypes. *Journal of Experimental Botany*, 61, (12), 3291-3303.
- HUNT JR E.R., ROCK B.N. (1989):** Detection of Changes in Leaf Water content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30, 43-54.
- LEVITT J. (1980):** Responses of plants to environmental stresses. Academic Press.
- PEÑUELAS J., ISLA R., FILELLA I., ARAUS J.L. (1997):** Visible and Near-Infrared Reflectance Assessment of Salinity Effects on Barley. *Crop Sci.*, 37, (1), 198-202.
- PUREVDORJ T., TATEISHI R., ISHYAMA T., HONDA Y. (1998):** Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *Int. J. of Remote Sensing*, 19, (18), 3519-3535.
- ROUSE J.W. (1974):** Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (greenwave Effect) of Natural Vegetation. Texas A & M University, Remote Sensing Center.
- SIMS D.A., GAMON J.A. (2003):** Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 84, (4), 526-537.

Design of an Agricultural 3D-Plant-Camera by applying Modern Image Analysis Algorithms to a Single Camera for the Identification of Morphological Plant Parameters - Part I Basic Methods and Algorithms -

Minhui Li^{1,2}, Cornelia Weltzien^{1,2}, Volker Dworak¹, Morten S. Laursen³

¹ Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB), Max-Eyth-Allee 100, Potsdam,

² Technical University of Berlin, Berlin, Street 17. June 135, Berlin

³ Department of Engineering, Aarhus University, 8200 Aarhus, Denmark

E-Mail: MLi@atb-potsdam.de, CWeltzien@atb-potsdam.de, vdworak@atb-potsdam.de, msl@eng.au.dk

Abstract: *The 3D model of plants is of great interest as it allows a number of deductions of the plant status. To acquire reliable and repeatable 3D images of a plant under the extremely variable field conditions is very difficult. Previous research has shown that laser scanners are expensive and disadvantageous in terms of resolution, time of flight (TOF) cameras or laser profiling deliver poor results in bright sunlight and stereo cameras are unfavorable in terms of resolution and in terms of calculation power which is needed for high resolution 3D stereo imaging. On the other hand, some low-cost camera solutions exhibit a sufficient resolution, are relatively robust against the variable environment and need less calculation power. Addressing the problem, we propose a technique for an accurate algorithm of 3D plant models using the methods of block matching and 1D Phase-Only-Correlation (POC). The described method employs block matching with 2D rectangular image blocks for finding the possible regions with matching points, and we are proposing to use 1D POC for stereo correspondence search to find the accurate match. The 3D plant reconstruction will be done by using multiple images from a consumer digital camera. By combining the information layers of vegetation index (NDVI) and 3D morphology this proposed method could enhance the reliability of plant parameter determination for the application in precision agriculture.*

Keywords: *3D-Plant-Camera, Field Conditions, 3D-Plant-Model, 1D Phase-Only-Correlation (POC)*

1 Introduction and Basic Concept

Among the general cases of site-specific agricultural process control, it is hard for farmers to deal with some complex cultivation activities, e.g. structure analysis of crop canopy, morphology observation, and monitoring of growth stage of crop, etc. The 3D model of plants can locate the spatial position of the region of interest and provide more di-

verse information about the plant-growth parameters for cultivation management. As field plants have similar features which are additionally affected by complex and variable agricultural environment, 3D plant modeling is very difficult in terms of complete reconstruction under field conditions.

Previous research has shown that laser scanners are expensive and disadvantageous in terms of resolution, time of flight (TOF) cameras or laser profiling deliver poor results in bright sunlight and stereo cameras are unfavorable in terms of resolution and in terms of calculation power which is needed for high resolution 3D stereo imaging. Since the agricultural environment is extremely variable, these reconstruction methods are usually either time-consuming or have low-accuracy. In order to solve the difficulty of acquiring reliable and repeatable 3D-plant-models, and to enhance the accuracy of 3D plant models for field images, a new method is needed to help farmers to evaluate the growth stage of crop and reveal additional morphological information. 3D reconstruction is a basic method with the use of two or more images to build 3D models. The fuse of multiple 2D images with different viewpoints can create a composite that reveals information not accessible within 2D images. Previous work demonstrated results of 3D plant reconstructions, by using Structure from Motion (SfM), or by using Lidar, or taking a series of pictures, or getting models in lab environment (SHAFIEKHANI *et al.* 2017, FUMIKI *et al.* 2011, SANTOS *et al.* 2014, LI *et al.* 2015). For our infield application on 3D modelling we will continue this work with more efficient algorithms for better resolution even with reduced processing power. The POC seems to be a very promising solution for 3D reconstruction.

The flowchart of the complete image analysis process and the proposed relationship with the cultivation management system is shown in the **Figure 1**.

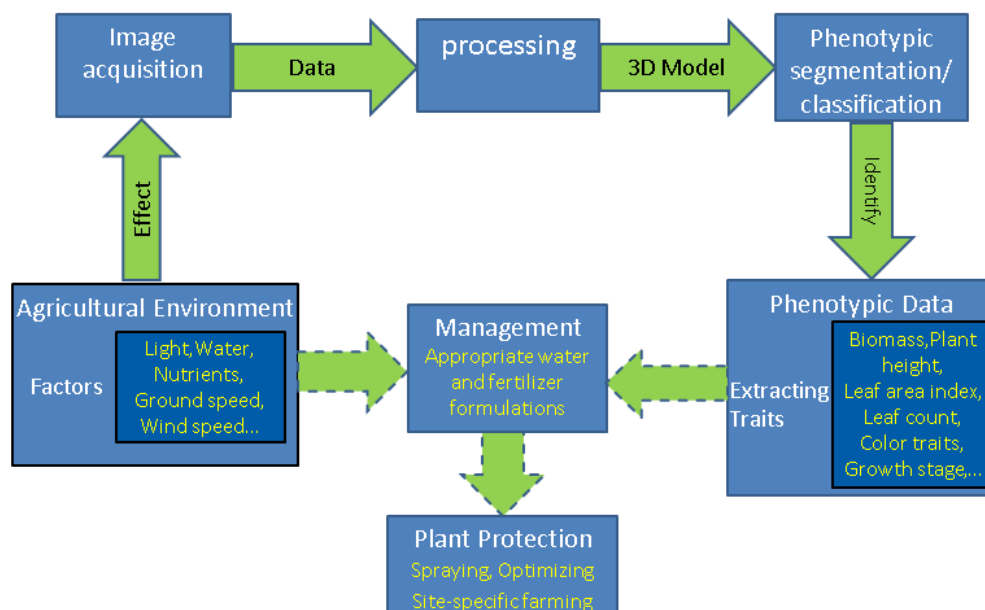


Figure 1: Flowchart of the image analysis process and the relationship with the cultivation management system

2 Image Analysis Process and Methods

The proposed 3D reconstruction process for plants consists of three main procedures each with featuring an analytical steps of its own:

The first procedure is image acquisition. In this step, a consumer digital camera is employed as the image acquisition unit, which could be installed on a moving vehicle e.g. a tractor. The digital camera shall feature a fairly low resolution (e.g. 512 x 512 pixels) but a high frame rate at around 60 fps and thus providing a high amount of images with small scene movements. Sensors on the vehicle will record rough estimates of the position and parameters of vehicle motion like changes in speed, direction, or state of rest. These parameters help to crosscheck whether the estimation of the camera position is correct and if the estimation of motion is reliably based on the vehicles inertia. While the moving vehicle follows the route in the field, a consecutive series of images is collected of the farmland and the crop in focus.

The second procedure is the “processing” of incoming multiple-view images. The challenge is to combine point cloud data into a consistent plant model. Therefore, the gathering of high density point cloud data with high 3D resolution is the starting point to comprise correct surface areas and reconstruct leaves and stems. After loading the 2D images, a small amount of interrelated features are needed to obtain the camera's external parameters, whereat the internal parameters have been obtained from previous calculations. Feature extraction algorithms are used and the RANSAC scheme is applied (FISCHLER & BOLLE 1981) to produce some inlier feature pairs between two neighboring images, in order to calculate rectified images.

Furthermore, a block matching method is employed to gain a rough estimation of a disparity map. The result is regarded as a reference for an accurate global disparity map. Then the 1D POC (SHIBAHARA *et al.* 2007) algorithm will be employed to calculate the movement in pixels of the 1D signal of the image midpoint. The disparity map is based on 1D-based algorithm rather than other 2D-based algorithms, so the computational cost can be significantly reduced; meanwhile 1D matching algorithm ensures higher accuracy. Consequential, the depth information and the 3D information of the original image can be easily obtained according to the rectified image pairs. One or two images from a near sight cannot show the whole picture of the plant. Therefore, according to the vehicle movement, overlapping images have to be taken, resulting in more complete 3D information through multiple view optimizations.

The third procedure is the phenotypic segmentation or classification. The 3D models will be enhanced by filtering and shaping functions based on the physical knowledge of the plant properties. Later, the model is properly phenotypically segmented, and allows the identification of multiple parameters for different growth stages of the crop. Traits like biomass, plant max height, growth stage, etc. can be extracted by subsequent algorithms.

3 Material and Methods

The first experiments are implemented in a laboratory environment. A single uncalibrated global shutter camera is equipped with a wide-angle lens which allows obtaining more overlapping area. The use of a tripod offers options for adjustment and stability. The image acquisition unit is shown in **Figure 2**.



Figure 2: The image acquisition unit: a camera (Ximea-MQ042CG-CM), a wide-angle lens (AZURE-06520ML5M) and a tripod (Manfrotto-074B)

The image acquisition unit was used to capture pairs of images. Different block sizes and disparity shift ranges have been tested, with image size of 512 x 512 pixels. A feature extraction algorithm SURF (BAY *et al.* 2006) and RANSAC scheme are used for providing the fundamental Matrix. The result of the proposed block matching technique for 3Dmodel is summarized in **Figure 3**.

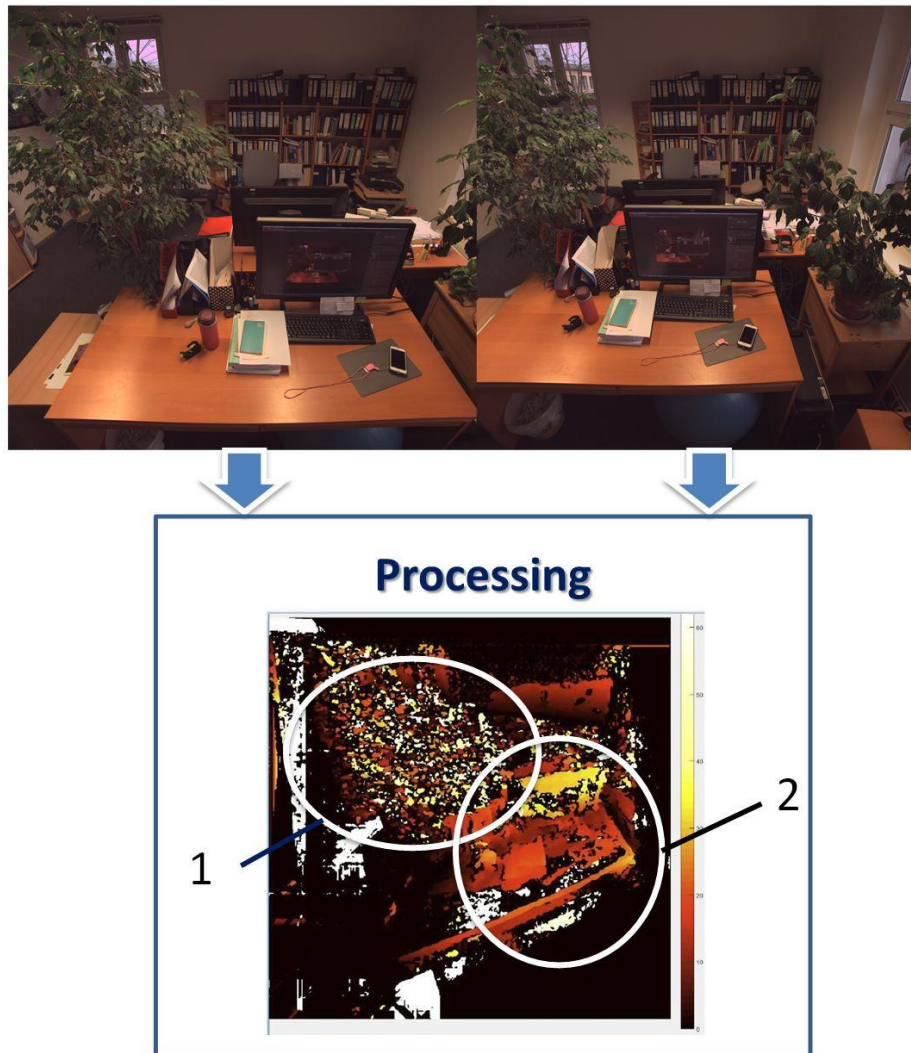


Figure 3: Disparity map derived by block matching technique, the color is representing the distance in pixels between matching points of an image pair

4 Discussion of Preliminary Results

The preliminary results show initial block matching between two images, with a block size of 5 x 5 pixels, represented as a disparity map. This information can be used as initial depth estimation for the 1D POC (compare second procedure Image Analysis Process and Methods). The applied algorithms are able to deliver good results in form of the disparity map, compare **Figure 3** the area under circle number 2. This circle highlights an area of relatively large structured objects compared to the movement of the viewpoint between the two images. In contrary the area under circle number 1 shows poor results of the disparity map. The reason is the filigree structure of the tree compared to the shift of the viewpoint. Do to the fairly wide shift in the viewpoint there are many leaves or parts of the tree which are obscured in one of the two images and therefore cannot be identified in both images. These black parts are unidentifiable by the algorithms. Therefore, the more filigree the structure the smaller the steps of the camera

movement have to be chosen to overcome this challenge. For the in-field application there will be additional distortions caused by wind induced movements of the leaves, this requires further research.

References

- BAY H., TUYTELAARS T., GOOL L.V. (2006):** SURF: Speeded Up Robust Features. Computer Vision - ECCV 2006, European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, 7-13 May, 2006, Volume110:404-417
- FISCHLER M.A., BOLLE R.C. (1981):** Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol. 24: 381-395
- FUMIKI H., KAZUSHIGE N., KENJI O. (2011):** 3-d modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information. Sensors, 11(2): 2166-2174.
- LI D., XU L., TAN C., GOODMAN E.D., FU D., XIN L. (2015):** Digitization and visualization of greenhouse tomato plants in indoor environments. Sensors, 15(2):4019-4051.
- SANTOS T.T., KOENIGKAN L.V., BARBEDO J.G.A., RODRIGUES G.C. (2014):** 3D Plant Modeling: Localization, Mapping and Segmentation for Plant Phenotyping Using a Single Hand-held Camera. Computer Vision Problems in Plant Phenotyping. Vol.8928:247-263
- SHIBAHARA T., AOKI T., NAKAJIMA H., KOBAYASHI K. (2007):** A Sub-Pixel Stereo Correspondence Technique Based on 1D Phase-only Correlation. IEEE International Conference on Image Processing Vol.5: 221 – 224
- SHAFIEKHANI A., KADAM S., FRITSCHI F.B., DESOUZA G.N. (2017):** Vinobot and Vinocular: Two Robotic Platforms for High-Throughput Field Phenotyping, Sensors, Vol. 17: 214

In der Reihe**Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

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

Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998
Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas TM , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005

Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005
Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005
Heft 43	Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer <i>Fuzzy-Logic</i> -Steuerung des Waschprozesses	2005
Heft 44	Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens	2005
Heft 45	Anwendung der Thermographie zur Optimierung der Belüftungssteuerung bei der Lagerhaltung landwirtschaftlicher Produkte	2005
Heft 46	Membranbioreaktor zur Aufbereitung von Schlachthofabwässern Prozesssteuerung von Biogasanlagen mit Kofermentation	2005
Heft 47	Verschleißeinfluss auf das Förderverhalten von Drehkolbenpumpen	2005
Heft 48	Qualitätserhaltung und Qualitätssicherung von Bioobst und Biogemüse in der Nachernte	2005
Heft 49	Miniaturisiertes Datenerfassungs-System zum Implantieren in Früchte und zur Messung ihrer mechanischen Belastung durch Ernte- und Nachernteverfahren	2005
Heft 50	Prozesskontrolle der Qualität von frischem Obst und Gemüse mit Hilfe eines Multigas-Sensors	2005
Heft 51	Entwicklung eines Echtzeitsensors für die Stärkebestimmung bei Kartoffeln als funktionaler Bestandteil eines optoelektronischen Verleseautomaten	2005
Heft 52	Optimierte Steuerung von Getreide-Schachttrocknern	2005
Heft 53	Möglichkeiten und Grenzen der energetischen Nutzung von Rizinusöl	2005
Heft 54	Non-Destructive Methods for Detecting Health-Promoting Compounds COST Action 924 Working Group Meeting	2005
Heft 55	4 th IFAC / CIGR Workshop Control Applications in Post - Harvest and Processing Technology (CAPPT 2006) 26th - 29th March 2006, Potsdam, GERMANY	2006
Heft 56	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2006	2006
Heft 57	Kontrolle der Frische in der Nacherntekette von Ökogemüse	2006
Heft 58	Entwicklung eines innovativen Dekontaminationsverfahrens als Technologieantwort auf zukünftiges Qualitätsmanagement im Nacherntebereich	2006

Heft 59	Experimental Studies and Mathematical Modelling of Solar Drying System for Production of High Quality Dried Tomato	2007
Heft 60	13. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft & 4. Workshop Precision Farming	2007
Heft 61	Energiepflanzen im Aufwind Wissenschaftliche Ergebnisse und praktische Erfahrungen zur Produktion von Biogaspflanzen und Feldholz	2007
Heft 62	14. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft	2008
Heft 63	Experten-Workshop Lagerung von Holzhackschnitzeln	2008
Heft 64	Postharvest unlimited 2008	2008
Heft 65	Vom Agrarrohstoff zu neuen Produkten – Verfahrenstechnische Forschung im Nacherntebereich	2009
Heft 66	16. Arbeitswissenschaftliches Kolloquium des VDI-MEG Arbeitskreises Arbeitswissenschaften im Landbau	2009
Heft 67	Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems	2009
Heft 68	Wieviel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss- Symposium des "Biogas-Crops-Network" (BCN) 7. Mai 2009 Potsdam	2009
Heft 69	Image Analysis for Agricultural Products and Processes 27 to 28. Aug. 2009 Potsdam	2009
Heft 70	5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management 31. Aug. to 02. Sept. 2009 Potsdam	2009
Heft 71	Einsatz von Biogas in PEM-Brennstoffzellen	2009
Heft 72	Teilflächenspezifische Grunddüngung	2009
Heft 73	16. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 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 Landwirtschaft 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. Ehlert 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 Biogasausbeute und Optimierung technischer Systeme zur Rückhaltung der mikrobiellen Biomasse BIOGAS-BIOFILM	2015
Heft 88	20. und 21. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 3. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft 26. Mai 2014, Osnabrück und 06. und 07. Mai 2015, Braunschweig	2015
Heft 89	International Biochar Symposium: Biochar Contribution to Sustainable Agriculture 28 th – 29 th May 2015, Potsdam	2015
Heft 90	ISHS Symposium 2016 “Sensing Plant Water Status” Methods and Applications in Horticultural Science 05 th – 07 th October 2016 Potsdam	2016

Heft 91	10 Th International FRUTIC Symposium Quality and Safety of Fresh Horticultural Commodities February 07, 2017	2017
Heft 92	Etablierung eines <i>core</i> -Mikrobioms für Biogasanlagen Genom-Sequenzierung von Isolaten aus Biogasanlagen und Mapping von Metagenom-Datensätzen BIOGAS-CORE	2017
Heft 93	22. Workshop Computer-Bildanalyse und Unbemannte auto- nom fliegende Systeme in der Landwirtschaft 23. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 21. April 2016, Wernigerode und 27. April 2017, Potsdam- Marquardt	2017

Interessenten wenden sich an:

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

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

Schutzgebühr Print: 20,00 Euro

CD-Rom: 10,00 Euro