

Neue leichtgewichtige Multispektralsensoren für Micro-UAVs – Sensorvergleiche und Leistungsuntersuchungen in der Agronomie

STEPHAN NEBIKER¹, SONJA LÄDERACH¹ & ERIC MATTI¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden mehrere leichtgewichtige Multispektralsensoren für UAVs im Low-Cost- und im High-End-Bereich mit Hilfe von Praxistests untersucht. Die Untersuchungen umfassen einer Serie von Befliegungen unterschiedlicher landwirtschaftlicher Kulturen mit dem Einbezug hyperspektraler und agrarischer Referenzdaten. Die Sensorvergleiche zeigen deutliche Qualitätsunterschiede zwischen den kostengünstigen Einkopfkameras und dem Mehrkopf-Multispektralsensor multiSPEC 4C, der eine sehr gute Übereinstimmung mit den bodengestützten Feldspektrometernmessungen aufweist. Die agrarwissenschaftlichen Untersuchungen bestätigen das große Potential UAV-basierter Multispektralsensoren, beispielsweise bei der Ertragsabschätzung und der Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts von Raps oder der Vitalitätsbeurteilung bei Kulturen wie Kartoffeln, Zuckerrüben oder auch Zwiebeln bei hohen geometrischen Auflösungen von 10 cm bis zu 2.5 cm. Die Untersuchungen zeigen aber auch die zentrale Bedeutung der Befliegungszeitpunkte auf, die auf die spezifische agrarische Fragestellung abgestimmt sein müssen.

1 Einleitung

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

2 Problemstellung

Zahlreiche Forschungsarbeiten widmen sich den UAV-Plattformen als solche. Eine aktuelle Übersicht über UAV-Plattformen im Bereich Photogrammetrie und Fernerkundung bieten COLOMINA & MOLINA (2014). Eine sehr hilfreiche Systematik zur Kategorisierung von boden- und

¹ Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, 4132 Muttenz, Schweiz; E-Mail: [stephan.nebiker, eric.matti]@fhnw.ch, sonja.laederach@students.fhnw.ch

luftgestützten Sensorplattformen im Bereich der agronomischen Forschung des Precision Farmings findet sich zudem in ZECA et al. (2013). In den letzten Jahren beschäftigten sich zahlreiche Forschungsarbeiten mit der Entwicklung und Validierung spezifischer Bildsensoren für zivile Mini- und Micro-UAVs, angefangen bei frühen leichtgewichtigen Multispektralsensoren (NEBIKER et al., 2008) mit einem zunehmenden Fokus auf hyperspektralen Bildsensoren (MÄKYNEN et al., 2012; SUOMALAINEN et al., 2014). Untersuchungen zu konkreten, praxisrelevanten Anwendungen von hochaufgelöster multi- und hyperspektraler Fernerkundung in der Agronomie sind demgegenüber noch deutlich weniger zahlreich. Eine aktuelle Übersicht über Experimente mit UAVs zur Fernerkundung von Vegetation findet sich in SALAMI et al. (2014).

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

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

Dazu werden im ersten Teil des Beitrags die eingesetzten Multispektralsensoren mit den unterstützten Spektralbereichen und den unterschiedlichen Typen von Spektralfiltern vorgestellt. Anschließend werden die verschiedenen Testgebiete mit den jeweiligen agronomischen Fragestellungen und den verfügbaren Referenzdaten präsentiert. Die Untersuchungen umfassen Ertragsabschätzungen für Raps- und Weizenversuchsfelder mit verschiedenen Sorten und Düngungen sowie etwa Untersuchungen von Pilzbefall bei Zuckerrüben. Als Referenzdaten standen bei den Raps- und Weizenversuchen umfassende Feldspektromettermessungen sowie Ertragsmessungen pro Testplot zur Verfügung.

3 Instrumentarium

3.1 UAV-Plattform

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden Mikro-UAVs vom Typ eBee der Firma senseFly eingesetzt (SENSEFLY, 2014a). Es handelt sich dabei um eine sehr leichtgewichtige Starrflügel-Konstruktion mit einem elektrisch angetriebenen Push-Propeller (Abb. 1). Im Vergleich zu Multikopter-UAVs bietet die eBee eine geringere Windanfälligkeit, eine relativ große Flächenleistung sowie einen vollautonomen Betrieb, der kaum Pilotenkenntnisse erfordert.

Tab. 1: Spezifikationen eBee (SENSEFLY, 2014a)
 Legende: (*) Sensoren mit autonomer Stromversorgung, (**) Prototyp-Sensor ohne eigene Stromversorgung

Gewicht (inkl. Kamera)	ca. 700 g
Flügelspannweite	96 cm
Fluggeschwindigkeit	40-90 km/h
Windgeschwindigkeit	bis 45 km/h
Max. Flugzeit	
- mit Standardsensoren (*)	max. 50'
- mit multiSPEC 4C (**)	max. 25'



Abb. 1: eBee Mikro-UAV der Firma senseFly

3.2 Multispektralsensoren

Für die Untersuchungen standen drei unterschiedliche, leichtgewichtige Multispektralsensoren zur Verfügung: zwei Low-Cost-Systeme Canon S110 NIR (Abb. 2) und S110 RE (Abb. 3) und ein High-End-System multiSPEC 4C (Abb. 4) in einer Prototypversion.

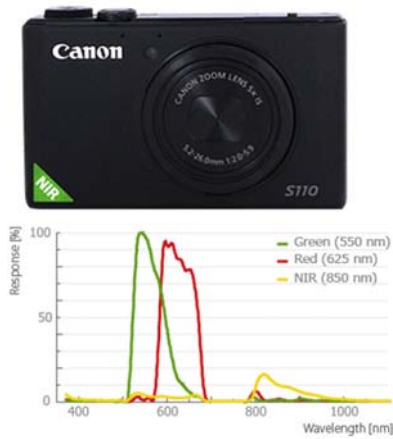


Abb. 2: Canon S110 NIR mit normalisierter Empfindlichkeit der Kanäle G,R und NIR in [%] (SENSEFLY, 2014b)

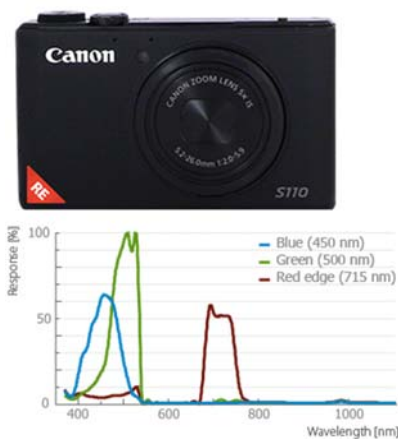


Abb. 3: Canon S110 RE mit normalisierter Empfindlichkeit der Kanäle B, G und Red Edge in [%] (SENSEFLY, 2014b)

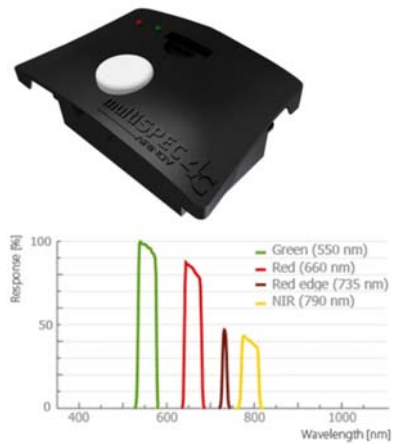


Abb. 4: multiSPEC 4C mit normalisierter Empfindlichkeit der Kanäle G, R, Red Edge und NIR in [%] (SENSEFLY, 2014b)

Die beiden Low-Cost-Systeme entsprechen der verbreiteten Kompaktkamera Canon S110 mit modifizierten Bayer-Farbfiltren. Anstelle der üblichen Filter für Blau, Grün und Rot hat das Modell S110 NIR Filter für die Spektralbereiche Grün, Rot und Nahes Infrarot und das Modell S110 RE für Blau, Grün und Red Edge. Da die Farbtrennung direkt am Sensor über Bayer-Filter erfolgt, kann die Kamera als Einkopf-System mit nur einer Optik realisiert werden, mit dem Vorteil exakt co-registrierter Farbkanäle aber dem beträchtlichen Nachteil sich überlappenden spektraler Empfindlichkeiten der einzelnen Farbkanäle (vgl. Abb. 2 & 3).

Im Gegensatz dazu ist die MultiSpec4 ein Mehrkopfsystem mit vier Optiken und vier monochromatischen CCD-Sensoren. Die Farbtrennung erfolgt hier an der Optik über Bandpass- bzw. Interferenzfilter, wie dies bereits in früheren Multispektralsensoren für UAV realisiert wurde (NEBIKER et al., 2008; TETRACAM, 2011). Über die Spezifikation von Zentralfrequenzen

und Bandbreiten erlauben Bandpassfilter eine scharfe Extraktion der gewünschten Spektralbänder (vgl. Abb. 4 und Tab. 1). Als Spezialität weist die MultiSpec4 einen zusätzlichen Strahlungssensor in Zenitrichtung auf, dessen weiße Abdeckung in Abbildung 4 gut sichtbar ist. Dieser Zenitsensor erlaubt eine zeitsynchrone Erfassung des einfallenden Sonnenlichts und dient als Referenzkanal zur Normalisierung der reflektierten Strahlung, die durch die vier nadirblickenden Spektralsensoren erfasst wird. Die spektrale Empfindlichkeit des Zenitsensors deckt das Spektrum zwischen 400 und 700 nm ab.

Tab. 1: Übersicht untersuchte UAV-Multispektralsensoren

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

3.3 Feldspektrometer

Für spektrale Referenzmessungen stand zudem ein kalibriertes, tragbares Feldspektrometer HandySpec Field der Firma tec5 zur Verfügung, welches speziell für die Messung diffuser Reflexions- und Emissionscharakteristika von Pflanzen und Bodenproben entwickelt wurde. Das Feldspektrometer erlaubt hyperspektrale Punktmessungen im Wellenlängenbereich von 360-1000 nm mit einer spektralen Auflösung von 3.3 nm. Das HandySpec-Feldspektrometer verfügt wie der MultiSpec4-Sensor über einen Referenzkanal im Zenit zur Kompensierung der zeitlichen Strahlungsunterschiede.

4 Untersuchungsgebiete und Befliegungen

4.1 Versuchsfelder und agrarische Fragestellungen

Für die technischen und agrarwissenschaftlichen Untersuchungen standen Versuchsfelder des Landwirtschaftlichen Zentrums Liebegg mit unterschiedlichen Kulturen zur Verfügung. Abhängig von der jeweiligen Fragestellung wurden die Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichen Sensoren und geometrischen Auflösungen und wo möglich wiederholt befliegen. In der Folge wird eine Auswahl der Testgebiete und der Befliegungen vorgestellt.

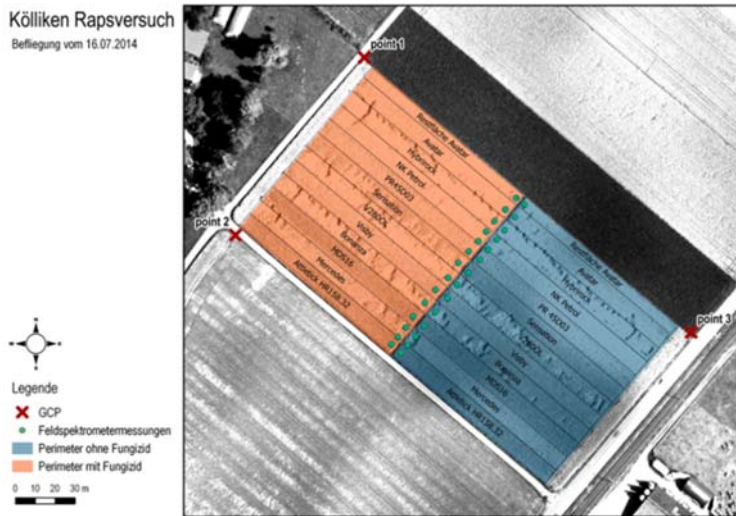


Abb. 5: Raps-Sortenversuch Kölliken mit Fungizidbehandlung (orange / links) und ohne Behandlung (blau / rechts).

In Kölliken, Kanton Aargau wurde ein Rapsversuch befliegen (Abb. 5). Zu den agrarwissenschaftlichen Fragestellungen gehören einerseits die Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts, der auf Grund der vertikal verteilten, schlecht einsehbaren Schoten, von Auge nur sehr schwierig zu bestimmen ist, und im vorliegenden Fall auch sorten- und behandlungsabhängige Ertragsabschätzungen. Gleichzeitig diente dieses Testgebiet als Basis für die Sensorvergleiche.

In einem zweiten Versuchsgebiet in Wohlen (AG), konnten pro Befliegung gleich drei verschiedene Experimente erfasst werden: ein Weizensortenversuch mit unterschiedlichen Dünge-Strategien, ein Zuckerrübenfeld mit potentiell *Cercospora*-Pilzbefall und ein Kartoffel-Sortenversuch mit potentieller Krautfäule und der Frage nach dem idealen Zeitpunkt der Krautvernichtung. Schließlich konnten in einem dritten Versuchsgebiet in Villmergen erste Voruntersuchungen im Gemüsebau durchgeführt werden, u.a. zur erforderlichen geometrischen Auflösung bei Kulturen mit geringer Blattfläche, wie dies bei Zwiebeln der Fall ist. Pro Untersuchungsgebiet wurden 3 bzw. 7 Passpunkte signalisiert und mit RTK-GNSS mit einer Lage- und Höhen Genauigkeit von ca. 1-2 cm bestimmt.

4.2 Befliegungen und Datenaufbereitung

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

Die Prozessierung der Bilddaten erfolgte mit der Standardsoftware Postflight Terra 3D, die als Bestandteil des eBee Gesamtsystems mitgeliefert wird. Für Fernerkundungsaufgaben umfasst die Prozessierung folgende Schritte: Bildorientierung / Bündelblockausgleichung unter Einbezug der aufgezeichneten Projektionszentren und Lagerung des Bildblocks auf den GCPs; Generierung einer 3D-Punktwolke bzw. eines Oberflächenmodells mittels Dense Image Matching; Orthophotogenerierung und -mosaikierung sowie die Berechnung sogenannter Reflectance Maps

und die anschließende Ableitung von Vegetationsindizes. Gemäss Hersteller erfolgt die Generierung der Reflectance Maps in Postflight Terra unter Einbezug der überlappenden Bildinformation und unter Berücksichtigung richtungsabhängiger Effekte. Bei der multiSPEC 4C erfolgt vorgängig zur Prozessierung eine radiometrische Kalibrierung der einzelnen Kanäle mittels Aufnahmen einer speziellen Kalibriertafel, die unmittelbar vor der jeweiligen Befliegung gemacht werden. Im Unterschied zu den Daten der kostengünstigen Einkopfkameras, erfolgt die geometrische Prozessierung der multiSPEC-Daten separat pro Bildkanal, was eine Vervielfachung des Rechenaufwands bewirkt. Die erzielbaren geometrischen Genauigkeiten der Bildorientierung waren nicht Schwerpunkt dieser Untersuchungen. Trotzdem wurden folgende konsistent gute durchschnittliche mittlere Fehler der Gewichtseinheit σ_0 erreicht: 0.32 Pixel bzw. 3.2 cm (multiSPEC 4C) und 0.22 Pixel bzw. 2.2 cm (S110 NIR und RE) bei einer GSD von 10 cm sowie ca. 0.35 Pixel bei GSDs von 2.5 cm und 5 cm (S110 NIR und RE).

5 Sensorvergleiche

Um einen direkten Vergleich der mittels Referenzkanals im Zenit normalisierten Messwerte des Mehrkopfsensors multiSPEC 4C mit den belichtungsabhängigen Messwerten der beiden S110 Multispektralsensoren zu ermöglichen, wurde ein geeigneter Index gewählt, der auf dem relativen Verhältnis der Messwerte basiert und der somit ebenfalls eine Normierung vornimmt. Im Falle der S110 NIR wurde dazu der Normalized Difference Vegetation Index $NDVI^2$ und im Falle der S110 RE wegen unkonventionellen Angebots an Spektralbändern ein RedEdge-Grün-Pseudoindex $REGPI^3$ verwendet. Als Referenz dienten Feldspektrometermessungen bzw. die daraus abgeleiteten zwei Indizes, wozu die Spektralbänder der verglichenen Sensoren (vgl. Tab. 1) aus den Hyperspektraldaten extrahiert wurden.

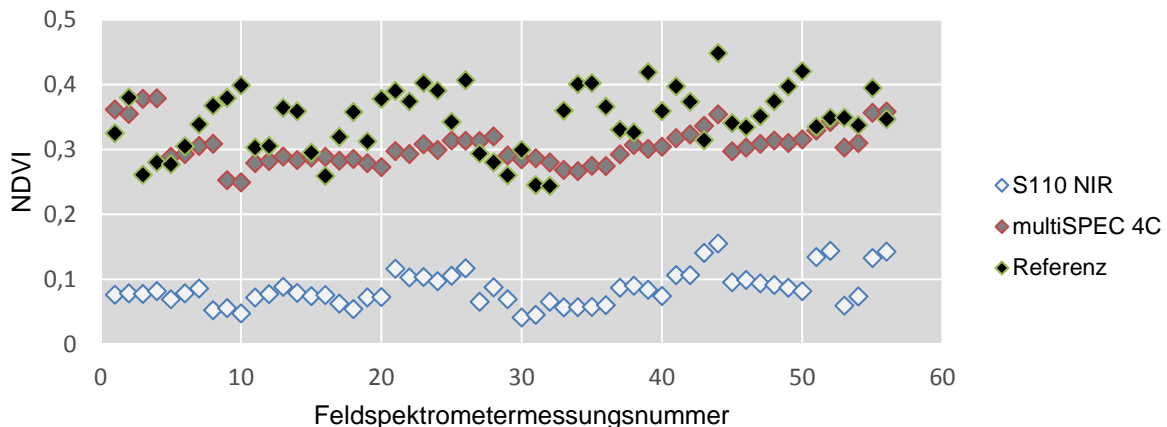


Abb. 6: NDVI-Wertevergleich für multiSPEC 4C, Canon S110 NIR und Feldspektrometer für identische Testplots im Rapsversuch Kölliken

² $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$

³ $REGPI = (Red\ Edge - Grün) / (Red\ Edge + Grün)$

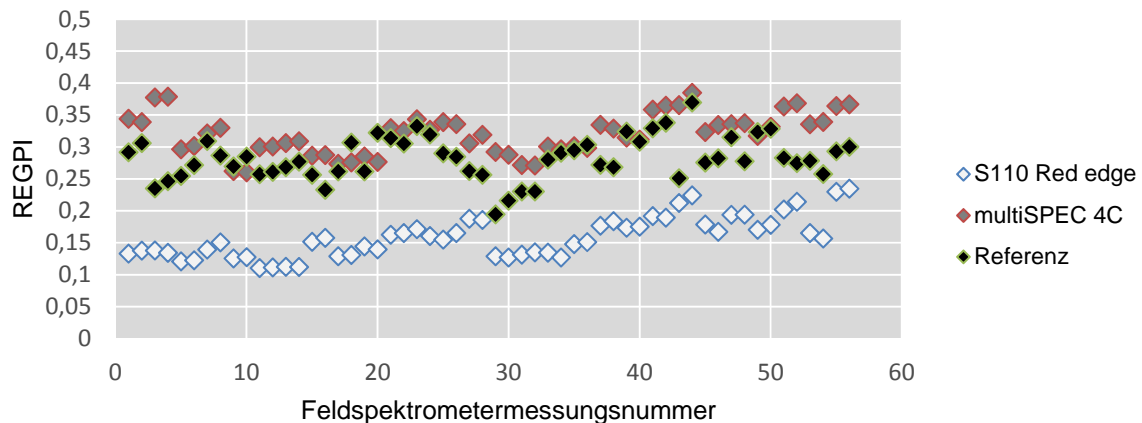


Abb. 7: RedEdge-Grün-Pseudoindex-Wertevergleich für multiSPEC 4C, Canon S110 RE und Feldspektrometer für identische Testplots im Rapsversuch Kölliken

Tab. 2: Vergleich der UAV-basierten Messungen mit unterschiedlichen Multispektralsensoren mit Feldspektrometer-Referenzmessungen anhand normierter Vegetationsindizes

Index	NDVI		Red Edge-Grün-Pseudoindex	
	multiSPEC 4C	S110 NIR	multiSPEC 4C	S110 NIR
Mittl. Abweichung	-0.040	-0.260	0.038	-0.124
Standardabweichung	0.057	0.048	0.037	0.035

Die Ergebnisse in Abbildungen Abb. 6 und Abb. 7 sowie in Tab. 2 stammen aus zeitnah durchgeführten Befliegungen des Rapsversuchs in Kölliken vom 16.7.14 mit den drei Multispektralsensoren und einer einheitlichen GSD von 10 cm. Pro Testplot bzw. pro Sorte lag eine Feldspektrometer-Referenzmessung vor, die beidseits der Trennlinie zwischen den behandelten und unbehandelten Plots erfasst worden waren (vgl. Abb. 5).

Der Vergleich der normierten Indizes aus den Messungen mit der multiSPEC 4C, den beiden S110 Kameras und dem Feldspektrometer als Referenz zeigt eine gute Übereinstimmung der multiSPEC-Messungen mit den Referenzdaten mit einer mittleren Abweichung von -0.040 bzw. 0.038, die im Bereich der Streuung der Referenzdaten liegt. Demgegenüber weisen beide Low-Cost-Systeme eine signifikante Abweichung von -0.260 bzw. -0.124 auf, mit Indexwerten, die systematisch zu tief sind. Die sehr gute Übereinstimmung der multiSPEC- und Feldspektrometermessungen mit mittleren Abweichungen von unter 0.05 NDVI-Einheiten sowie die großen systematischen Abweichungen der Canon-Kameras konnte mit den Messungen in den Weizenversuchen bestätigt werden (LÄDERACH, 2015). Die zu tiefen Indexwerte der beiden Low-Cost-Systeme S110 NIR und RE lassen sich durch deren überlappende Spektralkanäle und die damit verbundene unscharfe Farbtrennung erklären. So ist in Abb. 2 ersichtlich, dass der R-Kanal der S110 NIR auch Anteile des NIR-Spektrums erfasst (und umgekehrt) und in Abb. 3 ist erkennbar, dass der Red Edge Kanal der S100 RE auch Grünanteile erfasst. All diese Effekte führen zu einer Verfälschung bzw. Nivellierung der Vegetationsindizes in Richtung des Nullwerts.

6 Agrarwissenschaftliche Untersuchungen

In der Folge werden erste Ergebnisse zu ausgewählten Fragestellungen vorgestellt und diskutiert. Im Falle des Rapsversuchs Kölliken wurden mit Hilfe verschiedener Vegetationsindizes einerseits die Pflanzenvitalität unmittelbar vor der Ernte sowie deren Korrelation mit den gemessenen Ernteträgen untersucht.

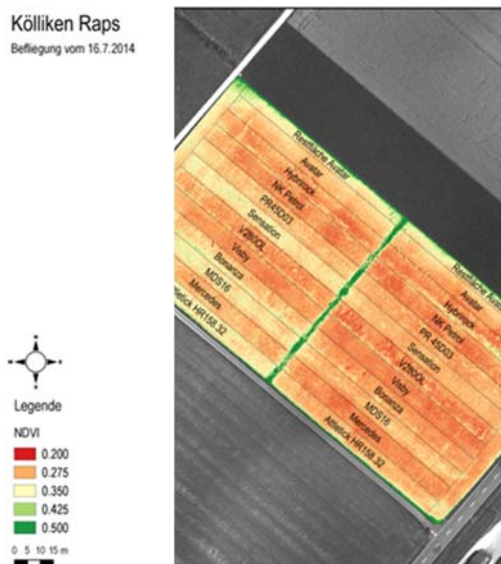


Abb. 8: NDVI-Karte Rapsversuch Kölliken (MultiSpec 4C, GSD 10 cm)

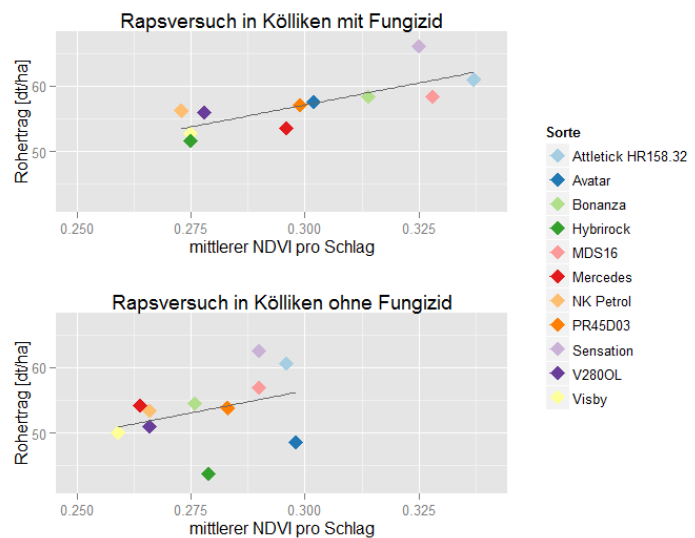


Abb. 9: Roherträge [dt/ha] pro Versuchsparzelle und Sorte in Funktion des gemittelten NDVI-Werts pro Parzelle (oben: mit Fungizid-Behandlung, unten: ohne Behandlung)

Obwohl die Befliegung wegen der schlechten Witterung im Sommer 2014 sehr spät, d.h. erst unmittelbar vor der Ernte erfolgte, zeigt die NDVI-Karte in Abb. 8 deutliche Vitalitätsunterschiede zwischen den einzelnen Sorten einerseits und eine höhere Vitalität des mit Fungizid behandelten Perimeters (Bildhälfte oben links) gegenüber dem unbehandelten Perimeter andererseits. Die meist höheren NDVI-Werte der behandelten Parzellen sind auch in Abb. 9 gut sichtbar. Offenbar führte die Fungizidbehandlung in diesem Fall zu einer Verlängerung der Pflanzenaktivität bis unmittelbar zum Erntezeitpunkt. Die Korrelation zwischen den Ernteträgen und den NDVI-Werten beträgt bei den behandelten Parzellen 0.78, bei den unbehandelten nur 0.35. Beim Green Normalized Difference Vegetation Index GNDVI⁴ reduziert sich die Korrelation für behandelte Parzellen leicht auf 0.67, erhöht sich aber bei den unbehandelten auf 0.66.

Die Untersuchungen der Rapskulturen wurden in analoger Weise und mit einer ähnlichen Zielsetzung auf die umfangreichen Sorten- und Düngeversuche für Weizen in Wohlen (AG) übertragen. Zwar konnten auch dort die Reflexionseigenschaften und verschiedene Vegetationsindizes für die nur wenige Quadratmeter großen Testparzellen sehr gut abgeleitet werden. Auf Grund der vollständig abgereiften Kulturen zeigten die Multispektraldaten jedoch keine

⁴ GNDVI = (NIR-G) / (NIR+G)

signifikanten Korrelationen mehr mit den Ertragsmessungen. Wie in LÄDERACH (2015) diskutiert wird, deckt sich diese geringe Korrelation im ausgereiften Stadium mit den Erkenntnissen verschiedener anderer Studien, u.a. von Wang (2014).

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

7 Fazit und Ausblick

In den vorgestellten Untersuchungen wurden zunächst die spektralen Eigenschaften verschiedener Multispektralsensoren analysiert. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen dem High-End-System multiSPEC 4C und den Consumer-Systemen S110 NIR und S110 RE. So ergab beispielsweise ein direkter Vergleich der NDVI-Indizes eine sehr gute Übereinstimmung der multiSPEC-Messungen mit den Feldspektrometermessungen mit einer durchschnittlichen Abweichung unter 0.05 beim Raps und Weizen gegenüber deutlich höheren Abweichungen für die S110 NIR. Ein analoger Vergleich für den S110 RE Sensor unter Einbezug des Red Edge-Kanals bestätigt den Befund deutlich besserer Messungen des multiSPEC-Sensors auf Grund der saubereren Kanaltrennung durch die Bandpassfilter. Auf Grund der signifikant besseren Messresultate und der Verfügbarkeit von vier Spektralkanälen, die ein deutlich breiteres Anwendungsspektrum abdecken, sind High-End-Systeme zumindest aus wissenschaftlicher Sicht zu bevorzugen. Wegen ihrer höheren geometrischen Auflösung und der etwas einfacheren Handhabung dürften aber kostengünstige Multispektralsensoren auch in Zukunft ihre Berechtigung haben – vor allem für visuelle Analysen und qualitative Aussagen über Varietäten innerhalb von Feldern.

Erste Untersuchungen zur Ertragsschätzung mittels Multispektraldaten zeigen beim Raps eine hohe Korrelation zwischen den NDVI- und GNDVI-Werten und den Referenz-Ertragsmessungen trotz des späten Befliegungszeitpunkts unmittelbar vor der Ernte. Beim Weizen hingegen kann unmittelbar vor der Ernte keine signifikante Korrelation zwischen spektralen Eigenschaften und den Erträgen mehr festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die Feldspektrometermessungen als auch für die Multispektraldaten aus den Befliegungen. Erste Untersuchungen im Gemüsebau mit sehr hohen geometrischen Auflösungen von bis zu 2.5 cm pro Pixel zeigen das Potential bei der Beurteilung von Kulturen mit geringer Blattoberfläche. Auf Grund der Ergebnisse aus dem vorliegenden Projekt und basierend auf weiteren Studien zur luft- und satellitengestützten Fernerkundung in der Agronomie konnten wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Untersuchungen gewonnen werden, insbesondere mit Blick auf ideale Reifestadien und Befliegungszeitpunkte für Analysen der Pflanzendüngung, für zuverlässige zukünftige Ertragsabschätzungen und für die frühzeitige Erkennung von Pflanzenstress. Das vorgestellte High-End-System mit seinen vier Spektralkanälen und einer höheren geometrischen Auflösung in der definitiven Fassung bietet dazu ein geeignetes Instrumentarium.

8 Literaturverzeichnis

- ANNEN, A., NEBIKER, S., OESCH, D., 2007: Einsatz von Mikro- und Minidrohnen für Fernerkundungsaufgaben in der agrochemischen Forschung und Entwicklung. Dreiländertagung der SGPBF, DGPF und OVG: Von der Medizintechnik bis zur Planetenforschung – Photogrammetrie und Fernerkundung für das 21. Jahrhundert. FHNW, Muttenz: DGPF Tagungsband **16**, S. 399-406.
- BARMETTLER, A., NEBIKER, S., KOCH, CH. ET AL., 2010: airAGro – Fernerkundungslösung für die Agronomie auf der Basis von Leichtflugzeugen und Minidrohnen. DGPF Tagungsband **19** – Dreiländertagung OVG, DGPF und SGPF, Wien, S. 156-164.
- COLOMINA, I., MOLINA, P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **92**, S. 79-97, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- LÄDERACH, S., 2015: Fernerkundung in der Agronomie mit Micro-UAV und neuen leichtgewichtigen Multispektralsensoren. Masterthesis, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz.
- MÄKYNEN, J., SAARI, H., HOLMLUND, C., MANNILA, R., & ANTILA, T. 2012: Multi- and hyperspectral UAV imaging system for forest and agriculture applications. Drury, Mark A.; Crocombe, Richard A. (eds.) *SPIE 8374, Next-Generation Spectroscopic Technologies V*, 837409 (May 1, 2012)., p. 837409-837409-9, DOI: 10.1117/12.918571.
- NEBIKER, S., ANNEN, A., SCHERRER, M., OESCH, D., 2008: A Light-weight Multispectral Sensor for Micro UAV – Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing, China: ISPRS, S. 1193-1200.
- SALAMÍ, E., BARRADO, C., PASTOR, E., 2014: UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing* **6**(11), S. 11051-11081, DOI: 10.3390/rs6111051.
- SENSEFLY, 2014a: eBee - The Professional Mapping Drone (Technical Specifications).
- SENSEFLY, 2014b: eBee Ag Camera Comparison.
https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/images/eBee-Ag-Cameracomparision.jpg.
- SUOMALAINEN, J., ANDERS, N., IQBAL, S., ROERINK, G., FRANKE, J., WENTING, P. & KOOISTRA, L., 2014: A Lightweight Hyperspectral Mapping System and Photogrammetric Processing Chain for Unmanned Aerial Vehicles. *Remote Sensing* **6**(11), S. 11013-11030, DOI: 10.3390/rs6111013.
- TETRACAM, 2011: Tetracam Mini-MCA. http://www.tetracam.com/Products-Mini_MCA.htm.
- WANG, L. ET AL., 2014: Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. *Field Crops Research*, 164, pp.178-188.
- ZECHA, C., LINK, J, CLAUPEIN, W., 2013: Mobile sensor platforms: categorisation and research applications in precision farming. *Journal of Sensors and Sensor Systems* **2**, S. 51-72, DOI: 10.5194/jsss-2-51-2013.