

## Validierung einer UAV-basierten Multispektralkamera zur Erfassung von Bestandesmerkmalen in Weizen

LUKAS PREY<sup>1</sup>, MICHAEL WEIGEL<sup>1</sup> & URS SCHMIDHALTER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Drohnenbasierte Systeme (UAV) werden zunehmend im Precision Farming zur schnellen und günstigen Erfassung kleinskalig unterschiedlicher Bestandesmerkmale sowie in der Phänotypisierung von Feldversuchen zum Erkennen genotypischer Unterschiede eingesetzt. Ziel der Untersuchung war der Vergleich einer an einer Drohne angebrachten Multispektralkamera mit einem Hyperspektralsensor eines bodenbasierten Multisensorsystems, um Biomasse und Stickstoffstatus in Winterweizenparzellenversuchen zu detektieren. Mit beiden System wurden nur mäßig gute Bezüge mit den Referenzwerten in der vegetativen Phase gefunden, jedoch wurden Kornertrag und Kornstickstoffstatus in einem Stickstoffdüngerversuch mit beiden Sensoren gut erfasst ( $R^2 > 0,6$ ). In einem Sortenversuch ergaben sich  $R^2$ -Werte bis 0,45 mit Red Edge-basierten UAV-Indizes und bis 0,55 mit einem Wasserbandenindex des Hyperspektralsensors, wobei die Bezüge durch Messen in der Kornfüllungsphase und durch die Wahl geeigneter Banden optimiert werden können. Die Ergebnisse legen die grundsätzliche Eignung beider Systeme nahe.*

### 1 Einleitung

Seit jeher ist die optische Beurteilung der Gesundheit und des Ernährungszustandes von Pflanzenbeständen entscheidend für eine angemessene Kulturführung. Mit der zunehmend strenger werdenden Regulierung im Düngerecht werden eine bedarfsorientierte Nährstoffzufuhr zur Vermeidung von Überschüssen sowie die Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen für die Bemessung der Düngung immer wichtiger. Eine besondere Bedeutung hat neben der Bemessung des Anwendungsniveaus von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln die teilflächenspezifische Bewirtschaftung gewonnen (ALBERT et al. 2006).

Zwar gibt es seit etwa 20 Jahren entsprechende Sensoren auf dem Markt, die zur Biomasse- und Stickstoffabschätzung online im Feld angewendet werden (SCHMIDHALTER 2015), jedoch ist deren Einsatz bedingt durch die hohen Kosten bisher besonders in kleinen Betrieben kaum verbreitet (SCHARF et al. 2011).

Die Etablierung von Fernerkundungssystemen auf Drohnenplattformen (engl. unmanned aerial vehicle, UAV), wie sie von technischer Seite in den letzten Jahren fortgeschritten ist, könnte ein bedeutender Schritt sein, um die teils erprobten Technologien bodenbasierter Sensoren einer breiteren Anwendung zuzuführen (WATTS et al. 2012). Hier erscheint eine Trennung hin zur Kartierung des Schlages in Ertragspotenzialzonen und mit bei Bedarf zusätzlicher Befliegung zur Erfassung des aktuellen Bestandeszustandes und der eigentlichen Anwendung zielführend. Dabei könnten Drohnensysteme zur Ertragskartierung eine günstige indirekte Alternative zu Systemen in Erntemaschinen sein.

---

<sup>1</sup> TU München, Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Emil-Ramann-Straße 2, D-85354 Freising, E-Mail: prey@wzw.tum.de

Hierzu erscheinen folgende Punkte von Bedeutung zu sein: (i) Überschaubare Kosten für den Endanwender, (ii) leichte Bedienbarkeit oder alternativ die Durchführung durch einen Dienstleister, (iii) technisch bedingt ausreichende Qualität der aufgenommenen Daten, (iv) zugängliche Interpretierbarkeit der Daten verbunden mit der Überführbarkeit in anwendbare Informationen sowie (v) eine verlässliche Validität der Informationen hinsichtlich abzuleitender Zielmerkmale. Mapping-Ansätze, die sich von der zeitnahen Messung zur Anwendung unterscheiden, haben den Vorteil, Bodeneffekte stabiler erfassen zu können, und bieten damit potentiell den Vorteil, langfristig als ertragslimitierend gefundene Faktoren zu berücksichtigen (HEIL & SCHMIDHALTER 2017; SCHMIDHALTER et al. 2008), wohingegen Düngesensoren den Vorteil zeitnaher Messung und damit der Erfassung jahresspezifischer Effekte mit sich bringen. Grundsätzlich können beide Strategien zielführend sein (EBERTSEDER et al. 2005).

Meist haben UAV-Systeme den Vorteil schneller Messungen, bei denen eine Befahrung des Bestandes und damit verbundene Fahrshäden vermieden werden kann. Dazu kommen potentiell niedrigere Kosten, wenn auf teure Trägerfahrzeuge verzichtet werden kann, die Möglichkeit, vom Boden aus schwer zugänglicher Stellen zu erfassen, die Vorteile des autonomen Fluges sowie meist die Verwendung bildgebender Sensoren, die per se eine bessere optische Bestandesbeurteilung ermöglichen und deren Information für den Endanwender zugänglicher ist.

Neben der Anwendung von Sensorsystemen für Praxisschläge kommt auch der Hochdurchsatz-Phänotypisierung im Feld eine zunehmende Bedeutung zu (HAGHIGHATTALAB et al. 2016; KEFAUVER et al. 2017; ZAMAN-ALLAH et al. 2015). Ziel dabei ist es dabei, die Leistungsfähigkeit verschiedener Genotypen zu beurteilen. Dies käme einer bedeutenden Zeit- und Kosteneinsparung für die Pflanzenzüchter gleich.

Verschiedene Pflanzenmerkmale sind bezüglich der Erfassung mit Boden- und UAV-basierten Systemen von Interesse. Hierzu zählen die Bodenbedeckung als Maß für die Frühentwicklung, die frühzeitige Erfassung der Pflanzenzahl (GNÄDINGER & SCHMIDHALTER 2017), die Bestandestemperatur um Wasserstress zu detektieren (KHOT et al. 2016), die Bonitur von Pflanzenhöhe und Lager mittels Bildsegmentierung oder aus Bildern erstellten 3D-Modellen (CHAPMAN et al. 2014; WATANABE et al. 2017), die Erkennung des Unkrautbesatzes (LÓPEZ-GRANADOS et al. 2016; RASMUSSEN et al. 2013), die Frühabschätzung des Ertragspotentials (Tattaris et al. 2016), die Erfassung des Nährstoffbedarfs und des Krankheitsbefalls (PSIROFONIA et al. 2017), die Identifikation von Kulturarten (REBETEZ et al. 2016), sowie die Blühdetektion und die zeitlich aufgelöste Detektion des Pflanzenwachstums (BENDIG et al. 2014) und der Seneszenz (SANKARAN et al. 2015).

Manche der Merkmale können dabei nur sinnvollerweise durch die mit UAVs mögliche hohe zeitliche Auflösung erfasst werden, da eine gesonderte Befahrung des Bestandes oft nicht möglich sein dürfte.

Weiterhin muss die Wahl des in Abhängigkeit von Plattform und Zielmerkmal passenden Sensors erfolgen. Die meisten Sensoren von einfachen RGB-Kameras bis hin zu hyperspektralen Spektrometern sind grundsätzlich auch mit UAV verwendbar (BARETH et al. 2014). Da bei der Sensorwahl aber ein Kompromiss zwischen Gewicht, Messgeschwindigkeit, räumlicher und zeitlicher Auflösung zu treffen ist, erscheint für die meisten Anwendungen die Verwendung von Multispektralkameras (MSK) ein sinnvoller Kompromiss zu sein. Bild- und Spektraldaten können dabei zu Vegetationsindizes verrechnet werden oder indirekt etwa über die Ableitung der

Bestandeshöhe mit Zielmerkmalen wie Biomasse in Bezug gesetzt werden (BENDIG et al. 2014; LIEBISCH et al. 2015; TATTARIS et al. 2016).

Die Verwendung adäquater Filter vorausgesetzt kann ein guter Bezug von multi- zu hyperspektralen Messungen erreicht werden (VON BUEREN et al. 2015).

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, die grundsätzliche Einsetzbarkeit einer drohnenbasierten MSK für die Erfassung von Biomassebildung und N-Aufnahme während des Schossens und der frühen Kornfüllungsphase im Vergleich zu hyperspektralen Referenzmessungen zu evaluieren.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Feldversuche

Der Sensorvergleich wurde an drei benachbarten Winterweizenversuchen am Standort Dürnast/Freising im Frühjahr 2017 durchgeführt. Dabei wurde ein Versuch mit Doppelhaploid-Zuchtlinien (V1), ein Sortenversuch mit zwei Stickstoffdüngestufen (60 und 120 kg N/ha) (V2), ein Stickstoffdüngerversuch mit 8 N-Stufen und 2 Sorten (V3) sowie ein Saaddichteversuch mit 4 Sorten und 3 Saaddichten (150, 250 und 350 Körner/m<sup>2</sup>) (V4) berücksichtigt. V1 bestand aus 36 Zuchtlinien und 3 Referenzsorten. In V2 waren zusätzlich zur Kontrollvariante ein Block mit einer Frühsaatvariante (Saat am 28.09.) und ein Block mit einer reduzierten Fungizidvariante angelegt, in dem außer einer Beizbehandlung kein Fungizid angewendet wurde. In beiden Blöcken waren 9 Sorten in beiden N-Stufen angelegt wohingegen die Kontrollvariante aus 26 Sorten, angelegt in denselben N-Stufen bestand. Der normale Saattermin war der 24.10.2016. In V2 wurde die N-Düngung in zwei Gaben appliziert (27.03 und 18.05.), in V1 zusätzlich am 08.06. Die Gaben betragen hier 50, 50 und 30 kg N/ha in der 1., 2. bzw. der 3. Gabe in V1. In V3 waren 8 N-Stufen angelegt, die in Abständen von 60 kg N/ha von 0 bis 420 kg N/ha reichten. Fungizidbehandlungen fanden am 18.05. und am 30.05. statt. Die Versuche waren 4-fach, V4 3-fach wiederholt angelegt. Die Vorfrucht aller Versuche war Klee gras.

### 2.2 Sensoren

Seit ca. 20 Jahren kommt am Lehrstuhl für Pflanzenernährung (TUM) die mobile Sensorplattform Phenotrac IV zum Einsatz, die sich aus der Erprobung in Feldversuchen heraus in verschiedenen Bauarten kontinuierlich weiterentwickelt hat (Abb. 1). Anfangs kamen überwiegend an Traktoren montierte gängige Düngesensoren zum Einsatz, die durch weitere Sensoren erweitert wurden. Zur Verfügung stehen die aktiv messenden Sensoren GreenSeeker RT100, CropCircle ACS 470 und Yara-Active Light Sensor (ALS), die jeweils nur über 2-4 spektrale Banden verfügen und sich in der Stärke der Lichtquelle, der spektralen Sensitivität und den Ansprüchen an die Messgeometrie unterscheiden (KIPP et al. 2014). Aktive Sensoren haben den Vorteil, unabhängig von der einfallenden Strahlung zu sein. Der gleichzeitig eingesetzte passive hyperspektrale Sensor (tec5, Oberursel, Deutschland) misst bidirektional hochaufgelöst von 300-1700 nm in nominaler Auflösung von ca. 3.3 nm. Zusätzlich kann die Bestandestemperatur mit zwei Punktsensoren sowie mittels Ultraschall- und Lasersensoren die Pflanzenhöhe erfasst werden. Die Sensordaten werden integriert in 5 Hz-Taktung mittels RTK zentimetergenau erfasst. Je nach Wachstumsstadium zeigten sich dabei bisher Unterschiede zwischen den Sensoren, wobei bei richtiger Auswahl von Vegetationsindizes der passive Hyperspektralsensor das beste Potential

zeigte (ERDLE et al. 2011). Mittels der mobilen Sensorplattform werden die Versuchspartzen mittig befahren.



Abb. 1: Mobile Sensorplattform Phenotrac IV (Lehrstuhl für Pflanzenernährung, TUM), ausgestattet mit Sensorarm und RTK-Antenne

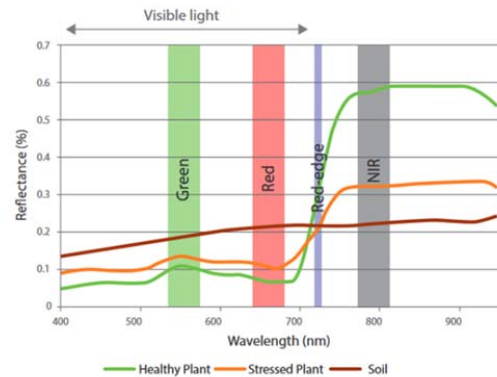


Abb. 2: Spektrale Signatur der verwendetet Sequoia-Multispektralkamera und übliche Spektren gesunder und gestresster Vegetation sowie des Bodens. Quelle: senseFly

Für die UAV-Befliegungen wurde die Starrflügler-Drohne eBee (senseFly, Cheseaux-Lausanne, Schweiz) eingesetzt. Daran war eine Sequoia-Multispektralkamera (Parrot, Paris, Frankreich) mit einer Auflösung von 1,2 MP montiert. Mit der Multispektralkamera (MSK) wurden Bilder in vier Banden aufgenommen, die mittels Referenzsensoren zur Erfassung der einfallenden Strahlung zu Reflektion verrechnet werden: Grün (530-570 nm), Rot (640-680 nm), Red Edge (730-740 nm) und NIR (770-810 nm) (Abb. 2). Die Drohne zeichnet sich durch die hohe Fluggeschwindigkeit bei niedrigem Energieverbrauch aus, so dass in Abhängigkeit der gewählten Überlappung und Auflösung die zusammenhängende Befliegung von etwa 20 ha möglich ist.

### 2.3 Beerntung, Sensormessungen und Datenauswertung

Über die Vegetationsperiode hinweg wurden von der Bestockung bis zur Gelbreife an 11 Terminen Messungen durchgeführt, wobei an vier Terminen in den BBCH-Stadien 32-73 um maximal einen Tag versetzt zusätzlich UAV-Befliegungen stattfanden. Dafür wurde die maximale Auflösung von 5 cm/Px bei einer Flughöhe von ca. 50 m und einer Überlappung von 80% in längs- und 60% in seitlicher Richtung gewählt. Die Flugroute wurde mit gesetzten Eckpunkten, gesteuert mit der Software eMotion 3.1 autonom befliegen. Begleitend zu den Befliegungen wurden Beerntungen der oberirdischen Biomasse in ausgewählten Parzellen in V2, V3 und V4 durchgeführt. Hierzu wurde in einer der inneren Saatzeilen auf der Länge von 1 m Biomasse geschnitten, bei T3 auf 2 m. Daraus wurde Trockenmasse (TM), sowie in V2 und V4 Stickstoffgehalt (Nconc) mittels NIRS-Analytik und die resultierende Stickstoffaufnahme (NA) ermittelt.

Tab. 1: Termine von Biomassebeerntung sowie UAV- und Spektralmessungen nach Wachstumsgradtagen. (<sup>1</sup>mit Basiswert 5°C, bezogen auf normale Saatzeit)

Termin	Wachstumsgradtage <sup>1</sup>	UAV	Spektral
T1	231	10.05.17	11.05.17
T2	286	16.05.17	17.05.17
T3	465	01.06.17	01.06.17
T4	533	08.06.17	08.06.17

Für die Spektralwerte wurde eine Versatzkorrektur durchgeführt, um die Daten dem RTK-Signal räumlich zuordnen zu können. Die UAV-Bilder wurden mittels der Software Pix4Dmapper Pro 3.2.23 zu einem Orthomosaik so zusammengesetzt, dass die Szenen möglichst Nadir und mit minimaler Winkelverzerrung nutzbar waren. Die Spektral- und UAV-Daten wurden auf Parzellenebene in ArcGIS (ESRI) aggregiert. Hierzu wurden jeweils die äußeren beiden Saatzeilen in Längsrichtung und die Stirnseiten zur Vermeidung von Randeffekten sowie die eigentliche Beerntungsfläche entfernt. Daten beider Systeme wurden zu verschiedenen Vegetationsindizes verrechnet. Die Reflexion der UAV-Banden wurde paarweise als „Simple-Ratio“ (SR) verrechnet, das heißt die Reflexion jeder Bande durch die einer zweiten anderen Bande geteilt. Für T3 und T4 wurden die UAV-Daten zweier SR gegen die analogen Indizes des Hyperspektralsensors validiert um die grundsätzliche Übereinstimmung der Daten zu testen.

Tab. 2. Tabelle getesteter Spektralindizes berechnet aus den bodenbasierten Phenotrac-Messungen. „Tec5“ bezeichnet den Hyperspektralsensor

Abkürzung	Sensor	Formel
CC730_670	CropCircle	R730/R670
CC760_730	CropCircle	R760/R730
CC760_670	CropCircle	R760/R670
SR_Greenseeker	Greenseeker	NIR/Red
NNI	ALS	R760/R730
Biomasse	ALS	R970/R900
R780/R550	tec5	R780/R550
R780/R670	tec5	R780/R670
R780/R700	tec5	R780/R700
R760/R730	tec5	R760/R730
R780/R740	tec5	R780/R740
R900/R970	tec5	R900/R970
Reip	tec5	$R700 + 40 \left( \frac{(R670 + R780)/2 - R700}{(R740 - R700)} \right)$
R1100/R1200	tec5	R1100/R1200

Für alle Termine wurden jeweils lineare Korrelationen zwischen Sensorindizes und den Zielmerkmalen TM, Nconc und NA zusammen für die Versuche V2 und V4 gerechnet. Dabei flossen für die UAV-Daten alle vier Wellenlängen, alle 6 daraus berechneten paarweisen Simple Ratio-Indizes sowie die normalisierten Indizes mit der NIR-Bande und der Grün- bzw. Rot-Bande ein. Für die bodenbasierten Sensoren wurden verschiedene Indizes verwendet, die sich

aus anderen Arbeiten mit dem Sensorsystem als geeignet für agronomische Merkmale gezeigt hatten (Tab. 2).

Zusätzlich wurden Beziehungen zum Kornertrag (V2 und V3) sowie zum Rohproteingehalt und Kornstickstoffgehalt (V3) getestet.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Sensor- und Referenzdaten

Bodenbasierte Sensormessungen konnten von Ende März bis 11. Juli durchgeführt werden, während UAV-Befliegungen nur während des Schossens bis in die frühe Milchreife (11. Mai bis 08. Juni) möglich waren, bevor es zu einem technischen Ausfall des Systems kam. Durch schematisch dargestellte Interpolation der Daten über die Messzeitpunkte zeigt sich in den Hyperspektraldaten ein typischer Verlauf mit starker Absorption im sichtbaren Spektrum und dem starken Reflexionsanstieg am Red Edge bis zum NIR-Bereich (Abb. 3 links). Abgeleitet vom NDVI (rechts) bestätigt sich ein rasches Entwickeln des Bestandes im April bis zum Erreichen eines Sättigungsniveaus etwa Mitte Mai, wobei sich der Vorsprung der Frühsaatvariante deutlich zeigt. Nach der Blüte ca. am 11. Juli trat eine stetige Abnahme des Indexwertes als Indikator für zunehmende Seneszenz auf. Hier kam es zu zunehmender Differenzierung mit niedrigeren Werten der Variante mit reduzierter Fungizidapplikation.

Grundsätzlich konnten mit beiden Sensorsystemen die Hauptbehandlungseffekte erkannt werden, wie für die Düngestufen in V3 erkennbar ist (Abb. 4).

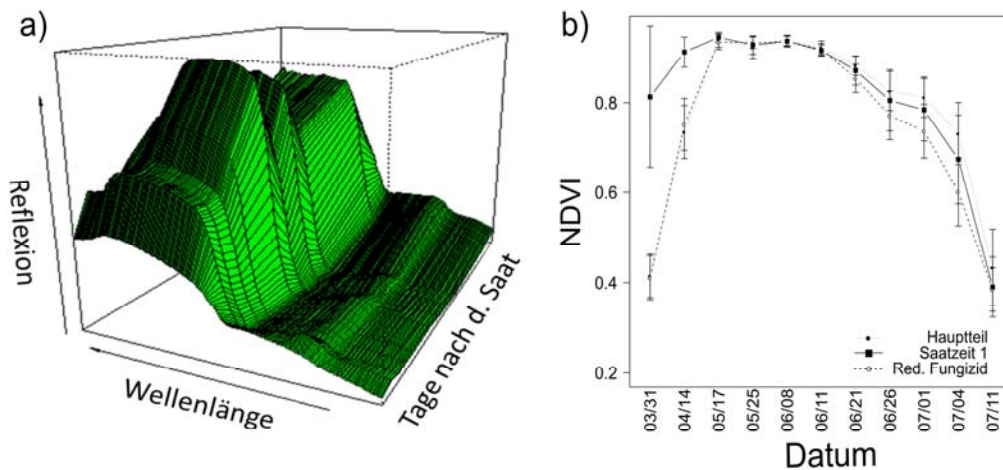


Abb. 3: Über die Zeitachse aus 11 Bestandesmessungen integrierte Pflanzenreflexion, schematisch als Mittelwert der zweiten N-Stufe in V2 dargestellt (a). NDVI dargestellt für verschiedene Messtage (Monat/Tag), aggregiert nach Versuchs-Hauptteilen (b)

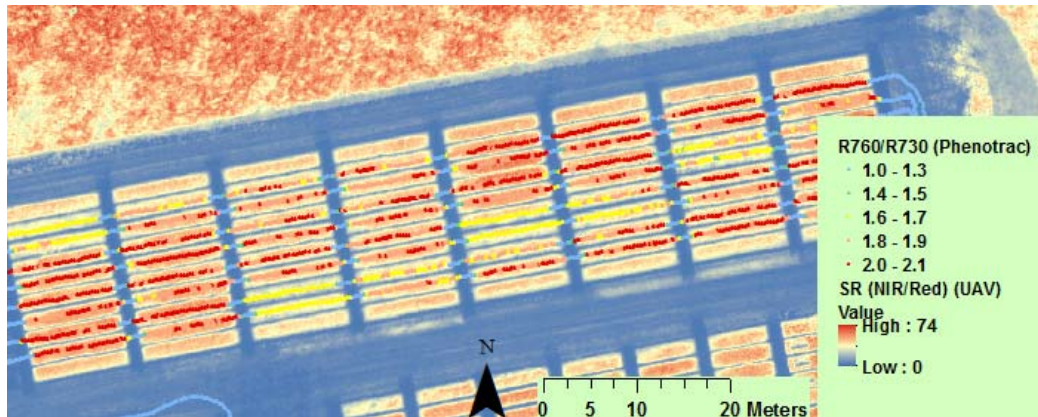


Abb. 4: UAV-SR (NIR/Red) (Karte) und NIR/Red-Verhältnis des Hyperspektralsensors (unten) am 08.06.2017 in V3. Die blockförmig angelegten Düngestufen sind gut erkennbar

Für die Referenzdaten war ein gewisser Versatz der TM zwischen V3 einerseits und V2 und V4 andererseits feststellbar (Abb. 5a), was zum Teil durch den Abfall in den niedrigsten N-Stufen in V3 erklärt werden kann. An allen Terminen wurden in den Parzellen in V4 leicht höhere Nconc Werte als in V2 gefunden. Dies könnte durch die meist höhere Bestandesdichte und einige wüchsige Sorten in V2 erklärt werden, so dass es hier vermutlich zu einem Verdünnungseffekt gekommen war (Lemaire et al. 2008). Dominiert durch höhere Nconc-Werte (Abb. 5b), zeigte aber V4 eine im Zeitverlauf zunehmend höhere N-Aufnahme als V2 (Abb. 5c). Dabei wurden zum Teil sehr hohe Werte erreicht, was auf die Vorfrucht und einen gewissen Parzelleneffekt zurückzuführen ist.

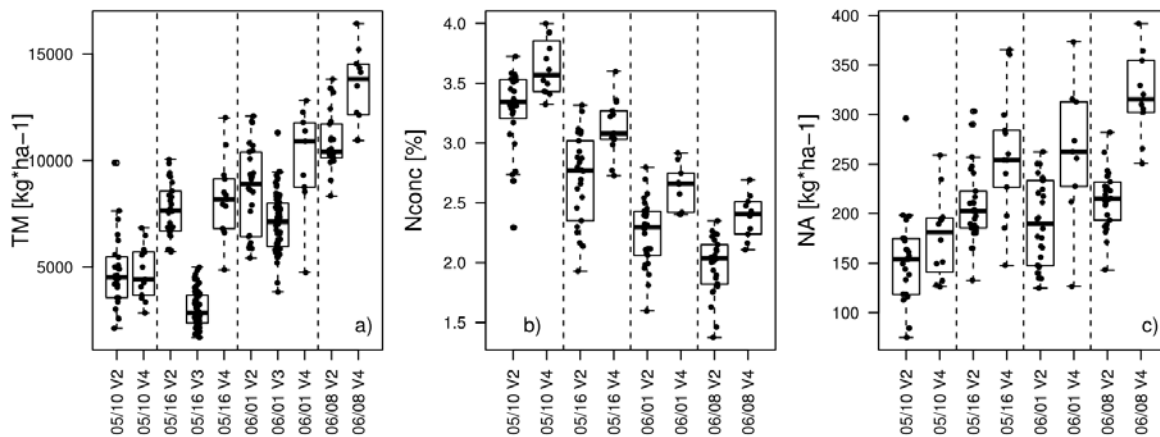


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung von TM (a), Nconc (b) und NA (c) nach Versuchen und Beerntungsdatum

Die SR-Werte der UAV-MSK zeigten je nach Messzeitpunkt unterschiedliche Entwicklungen (Abb. 6). Das Grün/Rot-Verhältnis (G/R) sättigte bis zum 06. Juni mit zunehmend niedrigeren Werten ab. Das Grün/Red Edge-Verhältnis zeigte hingegen keine konsistente Entwicklung, was auf die gleichzeitige Abnahme der Reflexion in beiden Banden zurückzuführen ist. Ähnlich wie G/R nahm auch G/NIR ab, stieg jedoch vom 01. bis 06. Juni wieder leicht an. Das Rot/Red Edge (R/RE)-Verhältnis zeigte einen inversen Verlauf zu G/R, jedoch mit einer stärkeren Differenzierung zwischen und innerhalb der Versuche in den beiden späteren Terminen, was auf einen



leichten Anstieg bzw. Abfall der Reflexion von R und RE zurückzuführen ist (nicht dargestellt). Einen ähnlichen Verlauf zeigt dabei R/NIR, jedoch mit schwächerer Differenzierung, da sowohl die R- als auch NIR- Reflexion tendenziell anstiegen. Eine stets starke Differenzierung innerhalb der Versuche ist für RE/NIR erkennbar, wobei sich zwischen 01. und 08. Juni kaum mehr Veränderungen zeigten.

Der Vergleich analoger Banden lässt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung zwischen den multi- und hyperspektralen Sensoren erkennen (Abb. 7 für T4). Höhere NIR/Rot-Werte des Hyperspektralsensors wurden jedoch weniger gut vom UAV-Index abgedeckt. Unterschiede könnten durch die Breite der Banden zustande kommen. Zudem ist ein direkter Vergleich durch Unterschiede im Messfeld beeinflusst, da das Messfeld punktueller Messungen des Phenotracs nicht exakt lokalisierbar ist.

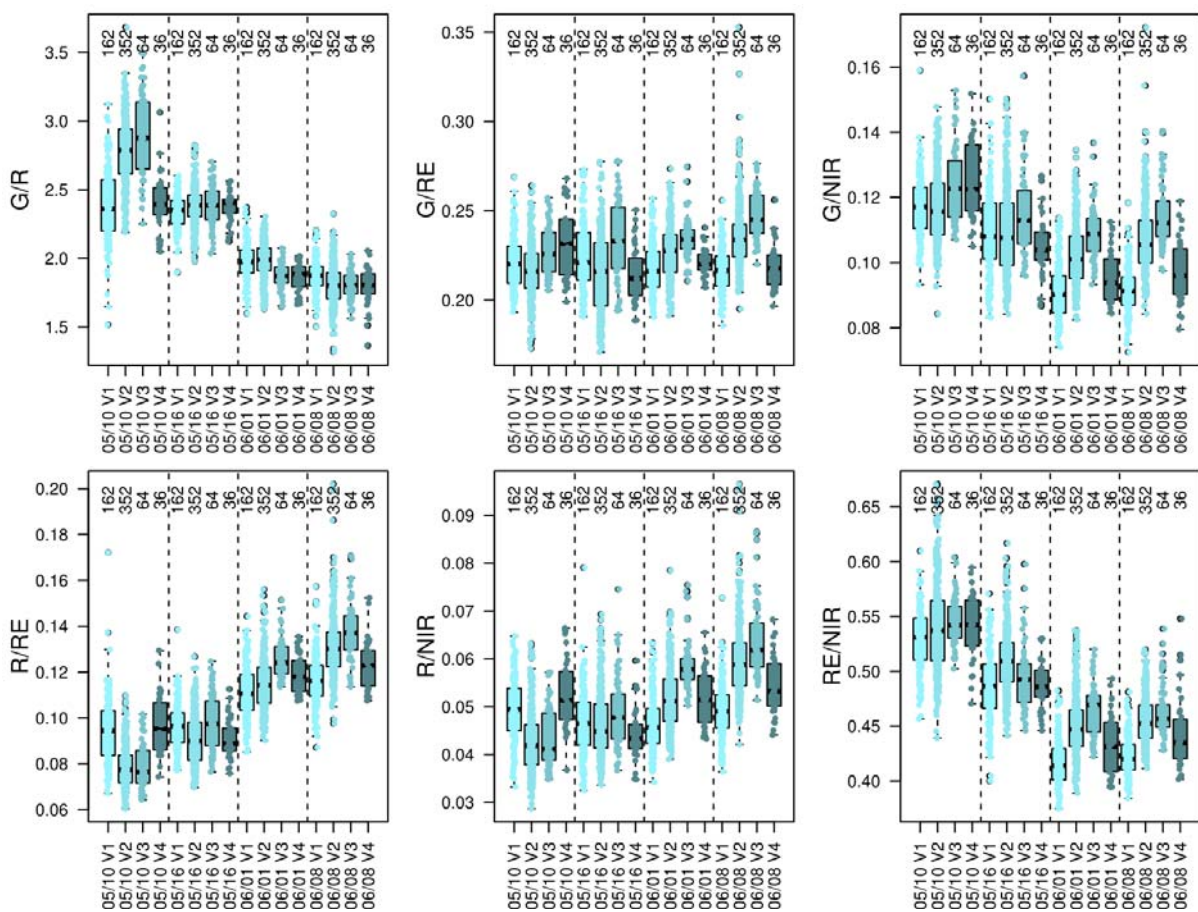


Abb. 6: Zeitliche Entwicklung der paarweise als ‚Simple Ratio‘ verrechneten UAV-Banden nach Versuchen und Beerntungsdatum: G: Grün, R: Rot, RE: Red Edge. Die Zahlen über den Boxplots beschreiben die Anzahl der verfügbaren Datenpunkte (Versuchspartellen)



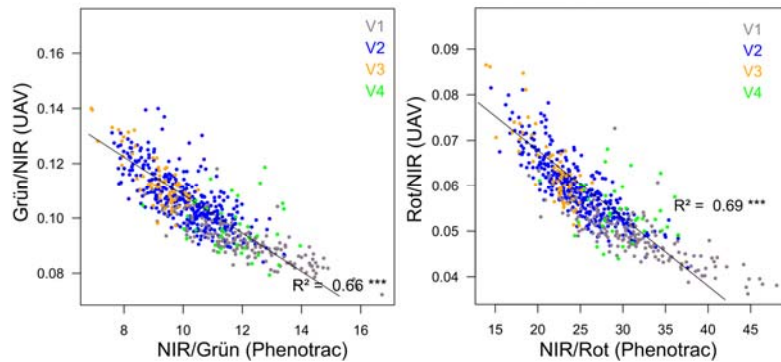


Abb. 7: Simple Ratios Grün/Rot und Rot/NIR aller Versuche dargestellt im Vergleich zu analogen Phenotrac-Indices zu T4 (08.06.)

### 3.2 Korrelationen mit destruktiv erfassten Bestandesmerkmalen

Für die destruktiv beernteten Merkmale TM, Nconc und NA wurden an V2 und V4 durchwegs maximal mäßig gute Bezüge mit den Sensordaten gefunden (Tab. 3,

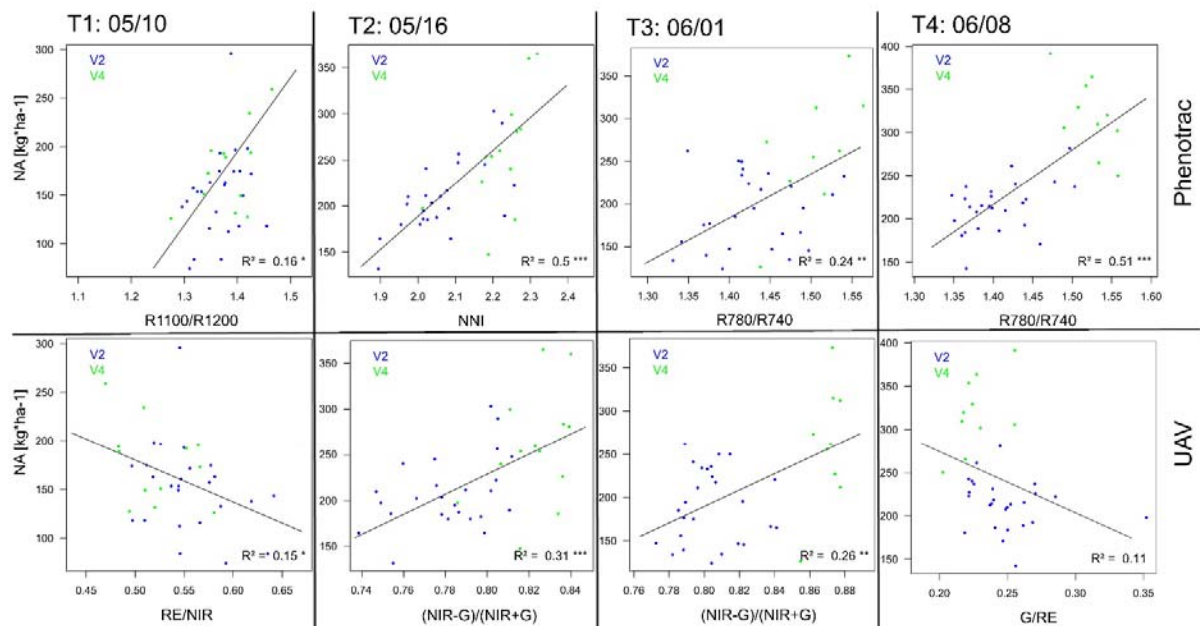


Abb. 8). Vor allem TM war mit beiden Sensoren mit einem maximalen  $R^2$  von 0.39 (T4, R1100/R1200) schwer erfassbar. Mit Ausnahme von NA an T3 waren die besten UAV-Indices den besten Phenotrac-Indices stets unterlegen. Zum einen standen verschiedene Sensoren als Referenz zur Verfügung, wobei für die Nconc stets einer der aktiv messenden Düngesensoren die besten Bezüge zeigte. Zum anderen bietet der Hyperspektralsensor deutlich mehr Möglichkeiten in der Indexberechnung. Hierbei hob sich vor allem in drei Testfällen R1100/R1200 ab. Daran bestätigen sich häufig gefundene gute Bezüge von Wasserbanden mit biomassebezogenen Merkmalen (PRASAD et al. 2007). Für die N-Aufnahme zeigte an T3 und T4 R780/R740 die besten Bezüge ( $R^2$  von 0.24 und 0.51), ein dem Red Edge Inflection Point (REIP) verwandter Index (MISTELE & SCHMIDHALTER 2006). Obwohl die getesteten UAV-Banden ähnliche Wellenlängen umfassten, zeigten sich an T4 deutlich schlechtere Bezüge. Mit Ausnahme der nur schwach sig-

nifikanten Korrelationen der UAV-Bande Rot für TM und anderen Korrelationen unter 0.2 wurden meist mit dem normalisierten Grün/NIR-Verhältnis die besten Bezüge unter den UAV-Indizes gefunden.

Tab. 3: Korrelationen für die jeweils besten gefundenen Indizes für TM, Nconc und NA nach Messtag für bodengestützte Phenotrac-Sensoren (PT) und UAV

Merkmal	Termin	R <sup>2</sup> <sub>max</sub> PT	bester Index PT	R <sup>2</sup> <sub>max</sub> UAV	bester Index UAV
TM	05/10	0.17*	R1100/R1200	0.14*	G/NIR
	05/16	0.24**	R780/R740	0.15*	Red
	06/01	0.25*	CC760/730	n.s.	RE/NIR
	06/08	0.39**	R1100/R1200	0.11*	Red
Nconc	05/10	0.22**	CC760/730	0.19**	G/R
	05/16	0.41***	NNI	0.18**	(NIR-G)/(NIR+G)
	06/01	0.40***	SR_Greenseeker	0.36***	(NIR-G)/(NIR+G)
	06/08	0.57***	SR_Greenseeker	n.s.	RE
NA	05/10	0.16*	R1100/R1200	0.15*	RE/NIR
	05/16	0.50*	NNI	0.31***	(NIR-G)/(NIR+G)
	06/01	0.24**	R780/R740	0.26**	(NIR-G)/(NIR+G)
	06/08	0.51***	R780/R740	n.s.	G/RE

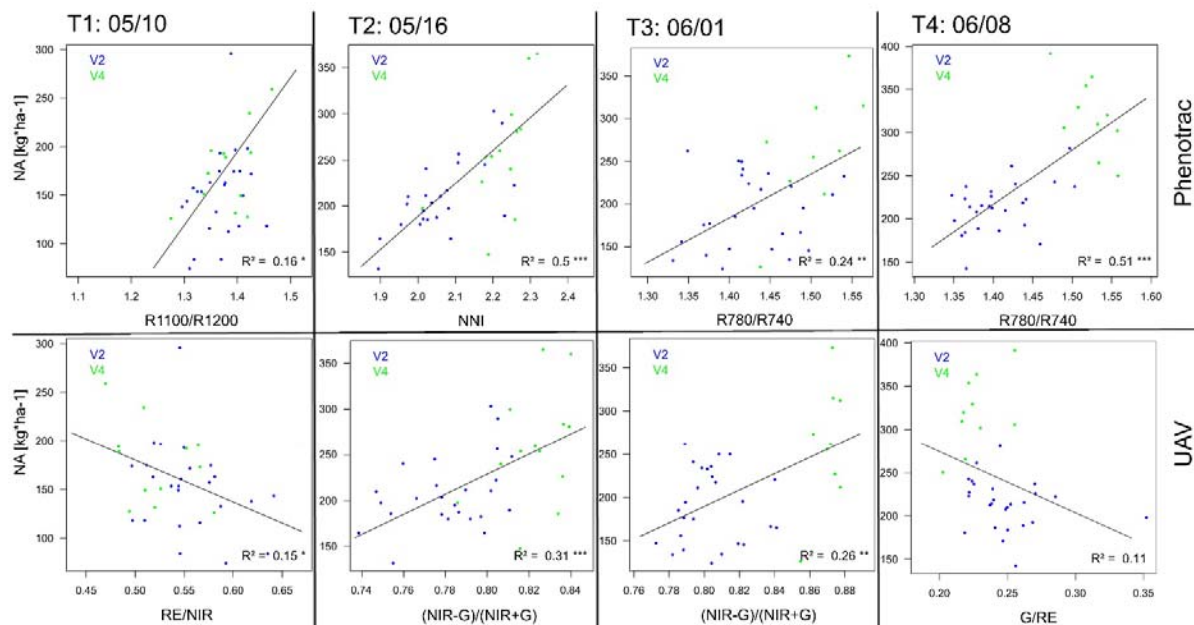


Abb. 8: NA: Darstellung im Bezug zu den jeweils besten Indizes analog zu Tab. 3 für Phenotrac-Sensoren (oben) und UAV (unten)

### 3.3 Korrelationen mit Kornertag und Korn-Stickstoff-Merkmalen

Zu den wichtigsten Merkmalen für Phänotypisierungsanwendungen in Feldversuchen zählen Kornertag und Rohproteingehalt, die den Korn-Stickstoffertag bestimmen. Gefördert von der Differenzierung durch die N-Stufen zeigten sich vor allem in V3 gute Bezüge zwischen UAV-Indizes und diesen drei Merkmalen (Tab. 4), die sich durch die Phenotrac-Indizes auf ähnlichem, aber kaum höherem Niveau bestätigen ließen (nicht dargestellt). Mit Ausnahme von T3 (01.06.),

an dem alle UAV-Indizes deutlich schlechtere  $R^2$ -Werte lieferten, war keine deutliche Abhängigkeit nach Messtagen erkennbar, jedoch nach Indizes: Das Grün-Rot-Verhältnis zeigte erneut kaum Bezüge, was die Notwendigkeit einer Red Edge- oder NIR-Bande bestätigt. Somit erscheint die Verwendung nur einer RGB-Kamera in geschlossenen Beständen nicht zielführend. Wie auch schon bei den destruktiv beernteten Merkmalen in V2, ergaben meist Kombinationen mit der NIR-Bande die besten Bezüge. Vor allem an den beiden frühen Messterminen war dabei das Verhältnis Rot zu NIR dem von Grün zu NIR überlegen. Dies widerspricht Literaturangaben zu Vorteilen der grünen Bande, bedingt durch geringere Absättigung in dichten Pflanzenbeständen (CRISTIANO et al. 2010), die sich aber auch bei Validierung der Sensoren an Mais meist nicht bestätigten (MISTELE & SCHMIDHALTER 2008). Trotz der zu erwartenden Sensitivität des Red Edge-Bereiches für den N-Status (GITELSON et al. 1996), war vor allem für Rohproteingehalt aber auch für Korn-N-Ertrag jede Kombination mit der Red Edge-Bande analogen Indizes mit NIR deutlich unterlegen. Nur für den Kornertrag ergab sich für Rot/Red Edge ein vergleichbares Niveau (Abb. 10). Hyperspektralindizes verglichen für die Abschätzung der absorbierten Strahlung hatten jedoch Vorteile einer NIR-Bande nahe über dem Red Edge bei ca. 750 nm für die Berechnung des NDVI gezeigt (VIÑA & GITELSON 2005), wofür die Red Edge-Bande der getesteten MSK offenbar aber in einem zu niedrigen Wellenlängenbereich liegt. Frühe Abschätzungen von Merkmalen zur Endreife kommen stets durch indirekte Bezüge über Biomasse, N-Aufnahme und Seneszenzeffekte zustande. Für V3 wurden nur zwei Sorten aber acht N-Stufen angebaut, wobei die N-Düngung in der gesamten Wachstumsperiode gleichgerichtet das Reflexionssignal beeinflusst haben dürfte. Im Gegensatz hierzu waren in V2 die beiden N-Stufen aufgrund der Klee gras-Vorfrucht nur schwach wirksam, so dass Ertragsunterschiede stärker durch Effekte der Sorten sowie den Saatzeitpunkt und die Fungizidvarianten zustande kamen. Diese Einflüsse ändern sich jedoch stark im Wachstumsverlauf. Für die Hyperspektraldaten wurde in V2 mit ca. 60 Vegetationsindizes für alle 11 Messtage die Korrelation mit Kornertrag berechnet.

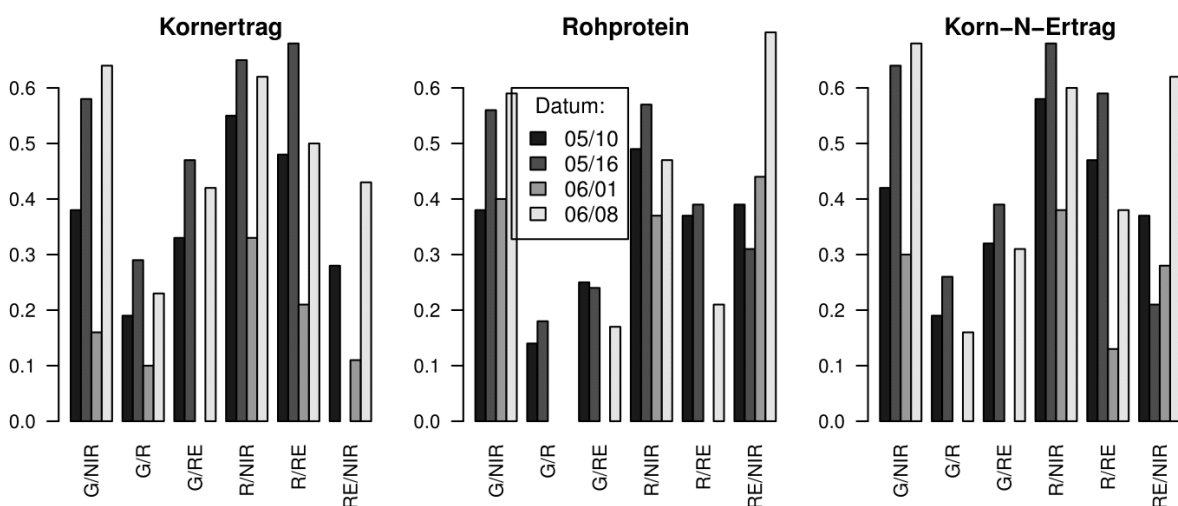


Abb. 9: Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) der UAV-SR-Indizes nach Messterminen für Kornertrag, Rohproteingehalt und Korn-N-Ertrag in V3.

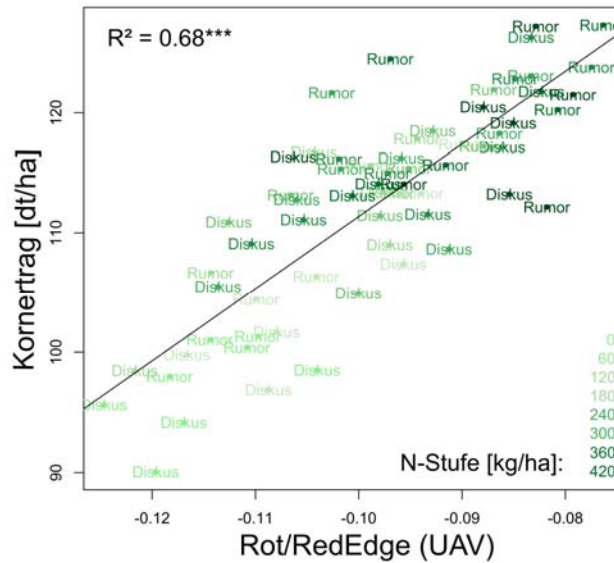


Abb. 10: Beziehung von Kornertrag und UAV-Red/RedEdge-Index am 16. Mai in V3, für beide Weizensorten kombiniert. Die Farbabstufung stellt die N-Stufen an

Tab. 4: Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ,  $p < 0.05$ ) der UAV-Indizes (links) und der hyperspektralen Phenotrac-Indizes mit Kornertrag in V2.<sup>1</sup>

Datum	G/R	G/RE	G/NIR	R/RE	R/NIR	RE/NIR	Mult. Regression	R780/R550	R780/R670	R760/R730	R780/R740	R900/R970	Reip	R1100/R1200
05/10	0.14	0.19	0.2	0.45	0.45		0.47				0.06	0.07	0.21	0.27
05/16	0.07		0.07	0.06	0.1	0.11	0.16	0.15	0.09	0.18	0.23	0.19	0.22	0.07
06/01			0.06			0.2	0.23	0.05	0.07	0.08	0.1	0.16	0.15	0.13
06/08	0.05		0.06			0.11	0.17	0.09		0.19	0.24	0.23	0.24	0.26

<sup>1</sup>Die Werte der aktiven Sensoren sind auf Grund niedriger Bezüge nicht dargestellt.

Hierbei zeigten sich insgesamt für den Wasserbandenindex (R970/R900) vor allem in der Kornfüllungsphase die besten Bezüge, wobei es bedingt durch die unterschiedliche Wirksamkeit der Behandlungen zu starken Unterschieden zwischen den Messtagen kam (Abb. 11). Wies WBI ebenso wie die anderen Indizes im Schossen kaum Bezüge auf (Abb. 11), so erreichten die die UAV-SR-Indizes R/RE und R/NIR hier am 11. Mai mittelgute Bezüge (0.45), fielen bei den folgenden Messtagen aber wieder ab. Auch hier zeigten sich Kombinationen mit der Grün-Bande unterlegen (Abb. 11). Die Verrechnung aller vier Kanäle in einer multiplen Regression ergab ebenfalls keine brauchbare Verbesserung. Aufgrund des Ausfalls der Drohne war es nicht möglich, die Bezüge in der Kornfüllungsphase zu testen. Trotz schwacher Ergebnisse bis zur Blüte zeigt sich somit der Kornertrag auch für verschiedene Sorten erfassbar, wobei meist aber erst nach der Blüte brauchbare Bezüge gefunden werden (Abb. 11). Da jedoch trotz niedrigerer spektraler Auflösung bessere Bezüge aus den UAV-Daten an manchen Tagen gefunden wurden, sollte der Drohneneinsatz auch in der späten Phase zielführend sein. Eine weitere Bande im Bereich 900-1000 nm könnte aber die Bezüge verbessern.

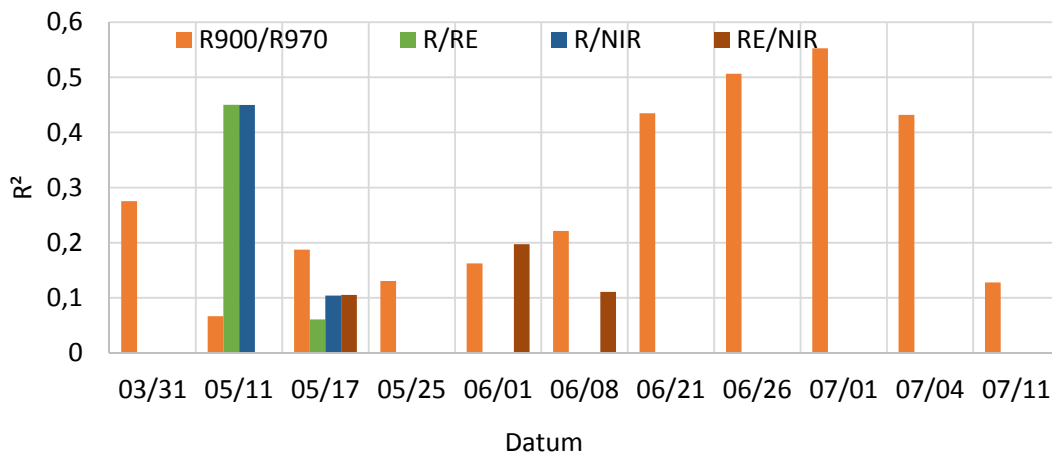


Abb. 11: V2: Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) ausgewählter UAV-Indizes (vgl. Tab. 4) an vier Terminen im Vergleich zu dem im Durchschnitt besten Hyperspektral-Index R900/R970 (11 Termine).

## 4 Schlussfolgerungen

Ziel der Untersuchung war es, die mit bodenbasierten Sensoren besser erprobten Methoden der Bestandserfassung, wie sie im Precision Farming im Einsatz sind und für die Phänotypisierung zunehmend optimiert werden, mit einer einfachen, an einer Drohne montierten Multispektralkamera (MSK) zu überprüfen. Dabei wurden (i) destruktiv beerntete Merkmale einiger Parzellen bis kurz nach der Blüte sowie (ii) Kornertrag und Korn-N-Ertrag und Rohproteingehalt erfasst. Trotz der stark differenzierten N-Düngung war deren Wirksamkeit in im N-Steigerungsversuch V3 wegen der Vorfrucht schwach, so dass Unterschiede im Kornertrag von maximal ca. 40 dt/ha bei hohem Ertragsniveau durchaus Heterogenitäten in Praxisschlägen abbilden. Somit zeigen die guten Korrelationen in (ii), dass das aktuelle UAV-System durchaus zur Erfassung von Praxisschlägen zum Einsatz kommen kann. Zwar wurden die Merkmale bei (i) allenfalls mittelgut erfasst, jedoch konnten sich nur manche der Vergleichssensoren an einigen Messtagen davon absetzen. Beides mag an der geringen Anzahl der Datenpunkte und der kleinen Beerntungsfläche liegen, wodurch ein räumlicher Versatz zu der von den Sensoren erfassten Fläche nicht vermeidbar war, aber durch Heterogenitäten innerhalb der Parzellen überlagert war. Dennoch müssen gefundene Bezüge in (ii) durch die Erfassbarkeit von Biomasse und N-Aufnahme zum Messzeitpunkt zu erklären sein. Die oft relativ guten Korrelationen von Wasserbandenindizes des Hyperspektralsensors lassen darauf schließen, dass auch die MSK von einer ähnlichen Bande profitieren könnte. Die Rot-Bande war der Grün-Bande meist überlegen, welche aber in früheren Stadien zur Erfassung des Bedeckungsgrades ihre Berechtigung haben dürfte. Deutlich bessere Bezüge der MSK-Daten zu einem Zeitpunkt lassen auf den Vorteil zeitlich fast simultaner Messung innerhalb von ca. 10 Minuten schließen, wohingegen die bodenbasierte Messung der vier Versuche ca. 2-3 Stunden in Anspruch nahm und deshalb durch Veränderung der Einstrahlung, der Umgebungstemperatur und des Wasserstatus negativ beeinflusst werden kann. Zudem lagen an den Terminen T1 und T2 die Sensormessungen um einen Tag auseinander, was die direkte Vergleichbarkeit etwas einschränkt. Weitere Sensorvergleiche in früheren

als auch in späteren Wachstumsphasen, mit weiteren Kulturen und mehr Referenzdaten in der vegetativen Phase sind wünschenswert. Eine weitere Auswertung mit in V2 erfassten Seneszenzdaten schließt sich an. Für die Implementierung derartiger Systeme wären On-Farm-Versuche sowie Befliegungen von Zuchtgärten zielführend, wobei sich zum Teil ohnehin vorhandene Referenzdaten nutzen ließen.

## 5 Dank

Die Autoren danken der Firma SenseFly für die Bereitstellung des Drohnensystems. Weiterer Dank gilt Jürgen Plass für die Durchführung der Befliegung und die Vorprozessierung der UAV-Daten.

## 6 Literaturverzeichnis

- ALBERT, E., KOWALEWSKY, H. H., LORENZ, F., ORTSEIFEN, U. & SCHINTLING-HORNY, L. VON, 2006: N-Düngung effizient gestalten. DLG-Merkblatt, **350**, DLG Verlag Frankfurt.
- BARETH, G., AASEN, H., BENDIG, J., GNYP, M.L., BOLTEN, A., JUNG, A., MICHELS, R. & SOUKKAMÄKI, J., 2014: Spectral comparison of low-weight and UAV-based hyperspectral frame cameras with portable spectroradiometer measurements. Proc. Work. UAV-based Remote Sens. Methods Monit. Veg., **94**, 1-6.
- BENDIG, J., BOLTEN, A., BENNERTZ, S., BROSCHEIT, J., EICHFUSS, S. & BARETH, G., 2014: Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. Remote Sens., **6**, 10395-10412.
- CHAPMAN, S., MERZ, T., CHAN, A., JACKWAY, P., HRABAR, S., DRECCER, M., H., HOLLAND, E., ZHENG, B., LING, T. & JIMENEZ-BERNI, J., 2014: Pheno-Copter: A Low-Altitude, Autonomous Remote-Sensing Robotic Helicopter for High-Throughput Field-Based Phenotyping. Agronomy, **4**, 279-301.
- CRISTIANO, P.M., POSSE, G., DI BELLA, C.M. & JAIMES, F.R., 2010: Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture. Int. J. Remote Sens., **31**, 4095-4109.
- EBERTSEDER, T., SCHMIDHALTER, U., GU TSE, R., HEGE, U., JUNGERT, S. & STAFFORD, J. V., 2005: Evaluation of mapping and on-line nitrogen fertilizer application strategies in multi-year multi-location static field trials for increasing nitrogen use efficiency of cereals. Proc. Fifth Eur. Conf. Precis. Agric. 327-335.
- ERDLE, K., MISTELE, B. & SCHMIDHALTER, U., 2011: Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. F. Crop. Res., **124**, 74-84.
- GITELSON, A.A., MERZLYAK, M.N. & LICHTENTHALER, H.K., 1996: Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. J. Plant Physiol., **148**, 501-508.
- GNÄDINGER, F. & SCHMIDHALTER, U., 2017: Digital Counts of Maize Plants by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Remote Sens., **9**, 544.
- HAGHIGHATTALAB, A., GONZÁLEZ PÉREZ, L., MONDAL, S., SINGH, D., SCHINSTOCK, D.,



- RUTKOSKI, J., ORTIZ-MONASTERIO, I., SINGH, R.P., GOODIN, D. & POLAND, J., 2016: Application of unmanned aerial systems for high throughput phenotyping of large wheat breeding nurseries. *Plant Methods*, **12**, 35.
- HEIL, K. & SCHMIDHALTER, U., 2017: Improved evaluation of field experiments by accounting for inherent soil variability. *Eur. J. Agron.*, **89**, 1-15.
- KEFAUVER, S.C., VICENTE, R., VERGARA-DÍAZ, O. & FERNANDEZ-GALLEGO, J.A., 2017: Comparative UAV and Field Phenotyping to Assess Yield and Nitrogen Use Efficiency in Hybrid and Conventional Barley **8**, 1-15.
- KHOT, L.R., SANKARAN, &S., CARTER, A.H., JOHNSON, D.A. & CUMMINGS, T.F., 2016: UAS imaging-based decision tools for arid winter wheat and irrigated potato production management. *Int. J. Remote Sens.*, **37**, 125-137.
- KIPP, S., MISTELE, B. & SCHMIDHALTER, U., 2014: The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity. *Comput. Electron. Agric.*, **100**, 24-33.
- Lemaire, G., Jeuffroy, M.-H. & Gastal, F., 2008: Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. *Eur. J. Agron.*, **28**, 614-624.
- Liebisch, F., Kirchgessner, N., Schneider, D., Walter, A. & Hund, A., 2015: Remote, aerial phenotyping of maize traits with a mobile multi-sensor approach. *Plant Methods*, **11**, 9.
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., De Castro, A.-I., Serrano-Pérez, A., Mesas-Carrascosa & F.-J. Peña, J.-M., 2016: Object-based early monitoring of a grass weed in a grass crop using high resolution UAV imagery. *Agron. Sustain. Dev.*, **36**, 67.
- MISTELE, B. & SCHMIDHALTER, U., 2008: Spectral measurements of the total aerial N and biomass dry weight in maize using a quadrilateral-view optic. *F. Crop. Res.*, **106**, 94-103.
- MISTELE, B. & SCHMIDHALTER, U., 2006: Tractor-Based Quadrilateral Spectral Reflectance Measurements to Detect Biomass and Total Aerial Nitrogen in Winter Wheat. *Agron. J.*, **102**, 499-506.
- PRASAD, B., CARVER, B.F., STONE, M.L., BABAR, M.A., RAUN, W.R. & KLATT, A.R., 2007: Potential use of spectral reflectance indices as a selection tool for grain yield in winter wheat under great plains conditions. *Crop Sci.*, **47**, 1426-1440.
- PSIROFONIA, P., SAMARITAKIS, V., ELIOPOULOS, P. & POTAMITIS, I., 2017: Use of Unmanned Aerial Vehicles for Agricultural Applications with Emphasis on Crop Protection: Three Novel Case-studies. *Int. J. Agric. Sci. Technol.*, 30-39.
- RASMUSSEN, J., NIELSEN, J., GARCIA-RUIZ, F., CHRISTENSEN S. & STREIBIG, J.C., 2013: Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed Res.*, 242-248.
- REBETEZ, J., SATIZÁBAL, H.F., MOTA, M., NOLL, D., BÜCHI, L., WENDLING, M., CANNELLE, B., PEREZ-URIBE, A. & BURGOS, S., 2016: Augmenting a convolutional neural network with local histograms - A case study in crop classification from high-resolution UAV imagery. *ESANN 2016 - 24th Eur. Symp. Artif. Neural Networks*, 27-29.
- SANKARAN, S., KHOT, L.R., ESPINOZA, C.Z., JAROLMASJED, S., SATHUVALLI, V.R., VANDEMARK, G.J., MIKLAS, P.N., CARTER, A.H., PUMPHREY, M.O., KNOWLES & N.R., PAVEK, M.J., 2015: Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *Eur. J. Agron.*, **70**, 112-123.
- SCHARF, P.C., SHANNON, D.K., PALM, H.L., SUDDUTH, K.A., DRUMMOND, S.T., KITCHEN, N.R.,

- MUELLER, L.J., HUBBARD, V.C. & OLIVEIRA, L.F., 2011: Sensor-Based Nitrogen Applications Out-Performed Producer-Chosen Rates for Corn in On-Farm Demonstrations. *Agron. J.*, **103**, 1683.
- SCHMIDHALTER, U., MAIDL, F.-X., HEUWINKEL, H., DEMMEL, M., AUERNHAMMER, H., NOACK & P.O. ROTHMUND, M., 2008.: Precision Farming – Adaptation of Land Use Management to Small Scale Heterogeneity. *Perspectives for Agroecosystem Management*, 121-199.
- TATTARIS, M., REYNOLDS, M.P. & CHAPMAN, S.C., 2016: A Direct Comparison of Remote Sensing Approaches for High-Throughput Phenotyping in Plant Breeding. *Front. Plant Sci.*, **7**, 1-9.
- VIÑA, A. & GITELSON, A.A., 2005: New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 1-4.
- VON BUEREN, S.K., BURKART, A., HUENGI, 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.
- WATANABE, K., GUO, W., ARAI, K., TAKANASHI, H., KAJIYA-KANEGAE, H., KOBAYASHI, M., YANO, K., TOKUNAGA, T., FUJIWARA, T., TSUTSUMI, N. & IWATA, H., 2017: High-Throughput Phenotyping of Sorghum Plant Height Using an Unmanned Aerial Vehicle and Its Application to Genomic Prediction Modeling. *Front. Plant Sci.* **8**, 1-11.
- WATTS, A.C., AMBROSIA, V.G. & HINKLEY, E.A., 2012: Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, **4**(6), 1671-1692.
- ZAMAN-ALLAH, M., VERGARA, O., ARAUS, J.L., TAREKEGNE, A., MAGOROKOSHO, C., ZARCO-TEJADA, P.J., HORNERO, A., ALBÀ, A.H., DAS, B., CRAUFURD, P., OLSEN, M., PRASANNA, B.M. & CAIRNS, J., 2015: Unmanned aerial platform-based multi-spectral imaging for field phenotyping of maize. *Plant Methods*, **11**, 35.