

Wer kann was? - Aktive und passive Spektralsensoren im Pflanzenbau und ihre Unterschiede in der Differenzierung von Biomasseparametern bei Weizen

K. Erdle, B. Mistele, U. Schmidhalter

Department Pflanzenwissenschaften, Lehrstuhl für Pflanzenernährung, TU München, Freising

1. Einleitung

Die Anwendung von Remote Sensing in Landwirtschaft ist seit langem bekannt. Im Bestandesmanagement von Ackerkulturen sind traktorbasierte Systeme von großem Vorteil da Informationen sofort bereitgestellt und im Online-Verfahren genutzt werden können (Pinter et al., 2003). Spektrale Sensoren arbeiten entweder passiv oder aktiv, wobei passive Spektralsensoren auf Sonnenlicht angewiesen sind. Aktive Systeme hingegen verfügen über eine eigene Lichtquelle und ermöglichen so den Einsatz unabhängig von veränderlichem Sonnenlicht jedoch mit eingeschränktem Wellenlängenbereich. Beide Versionen, passive und aktive, messen das vom Pflanzenbestand reflektierte Licht indem sie Licht in ein elektrisches Signal umwandeln. Hierbei wird Licht in den Bereichen des sichtbaren Lichts (VIS, ca. 400-700 nm) und nahinfraroten Lichts (NIR, ca. 700-2 500 nm) gemessen. Reflektion im VIS-Bereich basiert hauptsächlich auf den Chlorophyllgehalt im Palisadengewebe des Blattes (Campbell, 2002). Die Reflektion im NIR Bereich hingegen ist stark von der Struktur der Mesophyllzellen beeinflusst (Campbell, 2002).

Der Simple-Ratio (SR) und der daraus entwickelte Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) basieren auf reflektiertem Licht des roten und NIR Spektralbereichs. Beide Indizes wurden lange zur indirekten Schätzung von Biomasse und Ertrag in Weizen genutzt (Pinter et al., 2003). Mittlerweile wurden weitere Vegetationsindizes entwickelt um auch agronomische Parameter wie N-Gehalt, N-Aufnahme und N-Effizienz zu schätzen (Li et al., 2008; Mistele und Schmidhalter, 2010a). VIS basierte Indizes neigen bei hohen Bestandesdichten zur Sättigung da bei hohen Chlorophyllmengen und deren Absorptionsstärke eine schlechtere Differenzierung möglich ist. NIR basierte Indices sollen resistenter gegen diesen Sättigungseffekt sein.

Beim Vergleich von Spektro Sensoren wurden in der Vergangenheit entweder lediglich die Spektraldaten verschiedener Systeme miteinander verglichen oder mehrere Indizes eines einzelnen Sensors mit Biomassedaten referenziert. Ein direkter Vergleich von mehreren Sensorsystemen, deren Vegetationsindizes und das Referenzieren mit Bestandesdaten wurde so noch nicht durchgeführt.

In dieser Arbeit werden passive und aktive Sensoren mit jeweils mehreren Vegetationsindizes in ihrer Fähigkeit verglichen agronomische Parameter eines Weizenbestandes wiederzugeben.

2. Material und Methoden

In den Jahren 2009 und 2010 wurden in einem 2-faktoriellen Feldversuch sieben Weizensorten (*Triticum aestivum* L.) (Tommi, Solitär, Impression, Pegassos, Ludwig, Cubus, Ellvis) angebaut. In vier N-Düngungsstufen (0, 100, 160 und 220 kg N ha⁻¹) wurden zu drei Terminen, BBCH37, 49 und 65, Teilernten durchgeführt und die Parameter Trockenmasse (TM), Frischmasse (FM), Trockensubstanz (TS), N-Gehalt, N-Aufnahme und der Nitrogen Nutrition Index (NNI) erhoben. Der NNI nach Lemaire und Gastal (1997) berechnet sich nach der Gleichung:

$$\text{NNI} = N_{\text{act}} / N_c$$

wobei N_{act} der tatsächliche N-Gehalt der Pflanze und N_c den kritischen N-Gehalt nach Justes et al. (1997):

$$N_c = 5.35 (\text{TM} [\text{t ha}^{-1}])^{-0.442}$$

darstellt.

Die spektralen Messungen mit aktiven und passiven Sensoren wurden jeweils vor den Teilernten durchgeführt. Dabei wurden die Sensoren in Nadir-Position und einer konstanten Höhe von 1.4 m über dem Boden über die Parzellen geführt. Hierbei entstanden pro Parzelle bis zu 40 Messpunkte, georeferenziert mit RTK-GPS Koordinaten (Trimble, Sunnyvale, CA, USA). Zur Auswertung wurden die 40 Parzellenwerte gemittelt.

Ein bi-direktionales Radiometer (BDR) (tec5, Oberusel) wurde als passiver Sensor installiert. Das BDR besaß zwei Zeiss MMS1 Diodenarray-Spektrometer mit einem Messbereich von 300-1700 nm (Mistele und Schmidhalter, 2010b). Die Spektrometer detektierten dabei das Sonnenlicht als Referenz bzw. die Reflektion des Bestandes.

Ein Active-Flash-Sensor (AFS) ähnlich zum YARA ALS (YARA International, ASA) wurde als einer der drei aktiven Spektrosensoren verwendet. Als Lichtquelle diente in diesem System ein Xenon Blitzlicht mit einem Spektralbereich von 650-1100 nm, wobei für die Messungen Filter für 730, 760, 900 und 970 nm gewählt wurden.

Desweiteren wurden die aktiven Sensorsysteme GreenSeeker (NTech Industries INC., Ukiah, Kalifornien) und CropCircle ACS-470 (Holland Scientific Inc., Lincoln, Nebraska) getestet. Beide Systeme arbeiten mit Licht emittierenden Dioden (LEDs) als Lichtquelle wobei sie unterschiedliche Wellenlängen messen. Der GreenSeeker misst lediglich die Wellenlängen 656 und 774 nm. Der CropCircle hingegen kann drei frei wählbare Wellenlängen detektieren wobei für dieses Experiment 670, 730, 760 nm gewählt wurden.

Obwohl einige Sensoren bereits berechnete Indizes als Output anbieten, wurden in dieser Arbeit Einzelwellenlängen aufgenommen und anschließend für die Berechnung unterschiedlicher Indizes kombiniert. Sieben Vegetationsindizes aus dem VIS und NIR Bereich wurden gewählt um das Reflektionsspektrum des Bestandes wiederzugeben (Tab. 1). Da die aktiven Sensorsysteme nicht immer die exakten Wellenlängen für die Berechnung der gewählten Indizes zur Verfügung stellten, wurden möglichst ähnliche Wellenlängen verwendet um die genannten Vegetationsindizes zu berechnen.

Der SR und NDVI wurden als Vegetationsindizes des VIS und NIR Spektralbereichs gewählt. Der Red-Edge-Inflection-Point (REIP) beinhaltet ebenfalls Informationen aus Chlorophyllabsorption und Zellstruktur (Guyot et al., 1988). Ein Index aus zwei NIR Wellenlängen zeigte bereits bei Mistele und Schmidhalter (2010b) enge Zusammenhänge zum N-Status bei Weizen. Der Wasser Index (WI) soll strukturelle Veränderungen basierend auf variierendem Zellwassergehalt darstellen (Penuelas et al., 1993). Aus dem VIS Bereich wurden die Vegetationsindizes PRI (Photochemical Reflectance Index, Gamon et al., 1992) und VARI (Visually Atmosphericly Resistant Vegetation Index, Gitelson et al., 2002) gewählt.

Im Jahr 2009 konnten mit dem AFS keine Daten erhoben werden. Im Jahr 2010 hingegen waren alle Sensoren im Einsatz. Sämtliche Spektralmessungen fanden zur Zeit höchster Sonneneinstrahlung statt, 11:00-13:00 Uhr MEZ, um bestmögliche Voraussetzungen für die passiven Messungen zu garantieren.

Eine ANOVA in SPSS 11 (SPSS Inc., Chicago, USA) mit $p = 0.05$ wurde für die Mittelwertvergleich hinzugezogen.

Tab 1: Spektrale Indizes zum Vergleich der Sensorsysteme.

Abkürzung	Formel	Referenz
NDVI	$(R_{780} - R_{670}) / (R_{780} + R_{670})$	(Rouse et al., 1974)
SR	R_{780} / R_{670}	(Pearson und Miller, 1972)
NIR/NIR	R_{780} / R_{740}	(Mistele und Schmidhalter, 2010b)
WI	R_{900} / R_{970}	(Peñuelas et al., 1993)
REIP	$700 + 40((R_{670} + R_{780}) / 2 - R_{700}) / (R_{740} - R_{700})$	(Guyot et al., 1988)
PRI	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$	(Gamon et al., 1992)
VARI	$(R_{550} - R_{650}) / (R_{550} + R_{650} - R_{470})$	(Gitelson et al., 2002)

3. Ergebnisse

Für alle Zwischenernten der Jahre 2009 und 2010 wurden die Mittelwerte der Bestandesparameter TM, FM, TS, N-Gehalt, N-Aufnahme und der NNI innerhalb zwischen den N-Düngungsstufen verglichen. Stellvertretend für die BBCH Stadien 37 und 49 sind die Ergebnisse des BBCH 65, des Stadiums der maximalen Biomasse, gezeigt (Abb. 1). Bei einem maximalen Biomasseertrag von 8.7 t TM ha⁻¹ ist deutlich zu erkennen, dass im Jahr 2009 die unterschiedlichen Düngevarianten signifikant voneinander zu unterscheiden sind. Im Vergleich dazu konnten in der Saison 2010 TM und FM der höchsten N-Stufen nicht signifikant voneinander unterschieden werden. Der Biomasseertrag dieses Jahres überstieg mit über 1,1 t TM ha⁻¹ deutlich den des Vorjahres. Alle verbleibenden Parameter konnten ihrer Düngungsstufe entsprechend voneinander unterschieden werden.

Zu BBCH 65 im Jahr 2009 konnten durch die Vegetationsindizes nahezu alle Düngungsstufen unterschieden werden. Lediglich die BDR-Indizes NDVI und VARI konnten die hohen N-Düngungsvarianten nicht mehr signifikant unterscheiden. Im Jahr 2010 waren zu BBCH 65 nur wenige Vegetationsindizes fähig alle vier Düngungsstufen signifikant voneinander zu unterscheiden. Die Indizes

NDVI, ein SR (R_{730}/R_{670}), PRI und VARI des Sensors BDR konnten bereits ab einer N-Applikationsmenge von 100 kg N ha^{-1} keine signifikanten Unterschiede mehr erkennen. Die SR Indizes R_{760}/R_{670} , R_{780}/R_{650} des BDR, der WI des BDR und des AFS und der REIP des BDR konnten die zwei höchsten N-Varianten 160 und 220 kg ha^{-1} nicht signifikant unterscheiden.

a)

kg N ha ⁻¹	TS				TM				N-Gehalt				N-Aufstand				FM				NNI			
0																								
100																								
160																								
220																								
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d

b)

kg N ha ⁻¹	TS				TM				N-Gehalt				N-Aufstand				FM				NNI			
0																								
100																								
160																								
220																								
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d

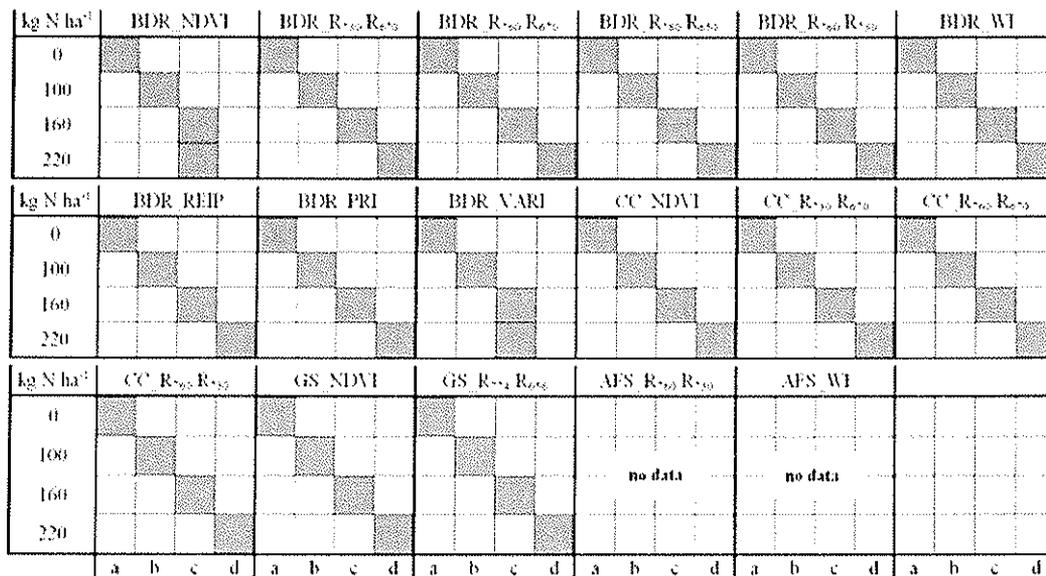
Abb. 1: Mittelwertvergleiche für die Bestandesparameter Trockensubstanz (TS), Trockenmasse (TM), N-Gehalt, N-Aufnahme, Frischmasse (FM) und den Nitrogen Nutrition Index (NNI) für das Entwicklungsstadium BBCH 65 der Jahre 2009, a), und 2010, b). Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den N-Applikationsstufen mit $p \leq 0.05$

Ebenso fanden einige Indizes des CropCircle, NDVI und SR R_{730}/R_{670} , und der NDVI des GreenSeeker keine signifikanten Unterschiede zwischen den zwei höchsten N-Applikationsstufen. Mit dem Greenseeker SR R_{774}/R_{656} im Jahr 2010 konnte keine der vier N-Düngungsstufen unterschieden werden.

4. Diskussion

Ein bi-direktionaler hyperspektraler Spektroskopensensor und drei aktive Spektroskopensensoren wurden auf ihre Fähigkeit hin getestet über zwei Vegetationsperioden hinweg unterschiedliche Ernährungszustände in Winterweizen wiederzugeben.

a)



b)

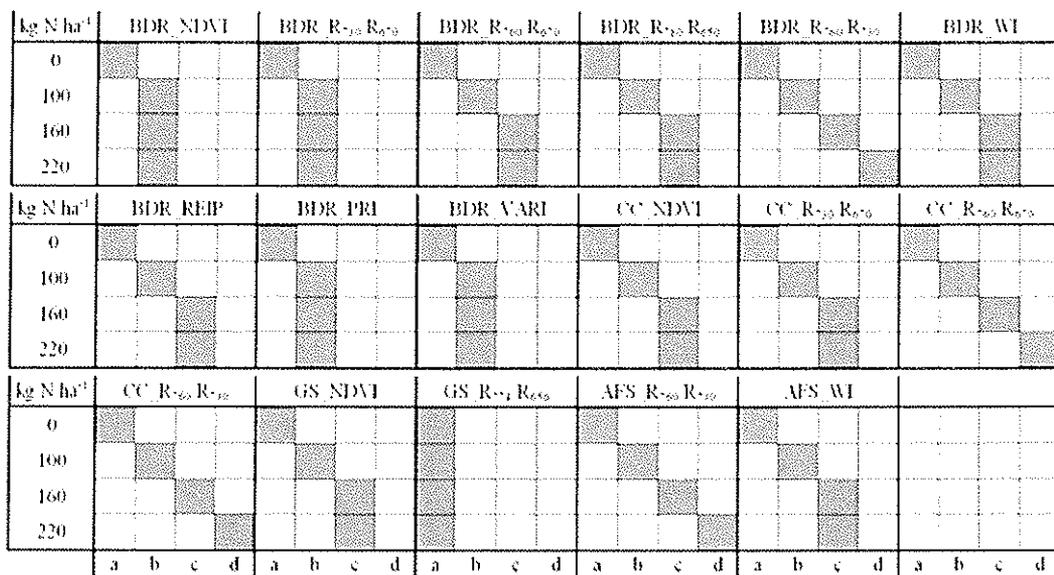


Abb.2: Mittelwertvergleiche der Vegetationsindizes des bidirektionalen Radiometers (BDR) und der aktiven Sensoren CropCircle (CC), GreenSeeker (GS) und den Active Flash Sensor (AFS) für das Entwicklungsstadium BBCH 65 der Jahre 2009, a), und 2010, b). Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den N-Applikationsstufen mit $p \leq 0.05$

Vegetationsindizes, welche auf Wellenlängen im Rot-Bereich basieren, neigen mit steigender N-Menge und hoher Bestandesdichte zur Sättigung auf Grund

hoher Absorption seitens des Chlorophylls. NIR-basierte Indizes hingegen sind diesem Effekt weniger stark ausgesetzt (Mistele und Schmidhalter 2010b). Speziell im Jahre 2010 war dieser Effekt zu erkennen. Bei hohen Biomassewerten von bis zu 11 t TM ha^{-1} im Jahr 2010 waren die Reflektionswerte der meisten VIS-basierten Indizes bereits von Sättigungseffekten beeinflusst.

Während die hohen N-Stufen bei TM und FM in 2010 selbst bei den Mittelwertvergleichen der Biomasseparameter nicht signifikant zu unterscheiden waren, konnten sämtliche N-Parameter (N-Gehalt, N-Aufnahme und der NNI) signifikant in allen N-Stufen unterschieden werden. Diese Parameter wurden in beiden Jahren vor allem von NIR-basierten Indizes qualitativ gut wiedergegeben. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits früher für die oberirdische N-Aufnahme gemacht (Mistele und Schmidhalter, 2010a,b). Vor allem der Vegetationsindex R_{760}/R_{730} aller diesen Index bietenden Sensoren konnte die N-Parameter der vier N-Stufen in beiden Jahren signifikant unterscheiden.

6. Zusammenfassung

Die vergleichbaren Vegetationsindizes der verschiedenen Sensorsysteme reagierten sehr ähnlich auf Veränderung der Bestandesparameter zwischen Düngungsstufen und Jahren. VIS-basierte Indizes neigten bei hohen Bestandesdichten zur Sättigung. NIR-basierte Vegetationsindizes zeigten eine höhere Resistenz gegen Sättigung. Vor allem der Index R_{760}/R_{730} der drei Systeme, BDR, CC und AFS, konnte die N-Parameter N-Gehalt, N-Aufnahme und NNI deutlich und über beide Jahre hinweg differenzieren.

Während hyperspektrale passive Sensoren einerseits eine sehr breite Spektralinformation liefern können, sind sie im Gegensatz zu den, noch auf wenige Wellenlängen begrenzte, aktiven Sensoren auf adäquate Lichtverhältnisse angewiesen. Hyperspektrale Sensoren bieten sich somit für die Findung neuer Zusammenhänge zwischen Reflektion und Bestandesparametern an, wobei die gefundenen Spektralbereiche dann auf aktive und anwenderfreundlichere Systeme übertragen werden können.

7. Literatur

- Campbell, J.B., 2002: Introduction to remote sensing. The Guilford Press, New York.
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B., 1992: A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* 41, 35-44.
- Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., Rundquist, D., 2002: Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens. Environ.* 80, 76-87.
- Guyot, G., Baret, F., Major, D.J., 1988: High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and the near infrared. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens.* 11, 750-760.
- Justes, E., Jeuffroy, M., Mary, B., 1997: Wheat, barley, and durum wheat. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 73-92.
- Lemaire, G., Gastal, F., 1997: N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 3-43.
- Li, F., Gnyp, M.L., Jia, L., Miao, Y., Yu, Z., Koppe, W., Bareth, G., Chen, X., Zhang, F., 2008: Estimating N status of winter wheat using a hand-held spectrometer in the North China Plain. *Field Crops Res.* 106, 77-85.
- Mistele, B., Schmidhalter, U., 2010a: A comparison of spectral reflectance and laser-induced chlorophyll fluorescence measurements to detect differences in aerial dry weight and nitrogen uptake of wheat. In: Khosla, R. (Ed.), *10th International Conference of Precision Agriculture*, Denver, Colorado.
- Mistele, B., Schmidhalter, U., 2010b: Tractor-based quadrilateral spectral reflectance measurements to detect biomass and total aerial nitrogen in winter wheat. *Agron. J.* 102, 499-506.
- Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972: Remote mapping of standing crop biomass for estimating of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado., 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, ERIM., Ann Arbor, MI, 1357-1381.
- Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T., Upchurch, D.R., 2003: Remote sensing for crop management. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69, 647-664.

- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Savé, R., 1993: The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *Int. J. of Remote Sens.* 14, 1887-1905.
- Rouse, J.W., Haas, J.R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, NASA SP-351., Third ERTS-1 Symposium. NASA, Washington, DC, 309-317.