

Vergleich von Spektralindizes zur Erfassung der Stickstoffaufnahme bei Winterweizen (*Triticum aestivum* L.)

Comparison of spectral indices to detect nitrogen uptake in winter wheat

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit dem Einsatz von Spektro Sensoren unter Verwendung von Spektralindizes zur gezielten Erfassung der Stickstoffaufnahme bei Winterweizen (*Triticum aestivum*). Ziel war es, die Güte und die Genauigkeit bekannter Vegetationsindizes zu quantifizieren und diese zu vergleichen. Darüber hinaus wurden für den Wellenlängenbereich 400 bis 900 nm in 2,8 nm-Schritten alle möglichen Zwei-Band-Indices errechnet und anhand von Korrelationsmatrizen deren Güte als Indikator für die Stickstoffversorgung beurteilt. Zu den Terminen EC 32, EC 39 und EC 65 wurden Spektralmessungen durchgeführt und anschließend ausgewertet. Zur Beurteilung der Qualität der Indices wurden parallel zu den Spektralmessungen destruktive Datenerhebungen an Pflanzenbeständen im Winterweizen durchgeführt. Zwischen der N-Aufnahme und den Indices PLSR, YARA_ALS und REIP_700 errechneten sich Bestimmtheitsmaße (R^2) von bis zu 0,9.

Neben den R^2 -Werten wurde außerdem die Sättigung, also die Veränderung der Messwerte gegenüber der divergierenden Stickstoffaufnahme der Pflanzen ermittelt. Als Vegetationsindizes mit besonders hoher Sättigung erwiesen sich der NDVI und der SAVI.

Stichwörter: Vegetationsindizes; Spektralmessung; PLSR; Korrelationsmatrizen; N-Aufnahme

Abstract

The present work deals with the use of spectral sensors with spectral indices for the targeted detection of nitro-

gen uptake in winter wheat (*Triticum aestivum*). The aim was to quantify and compare the quality and accuracy of known vegetation indices. In addition, for the wavelength range 400 to 900 nm in 2.8 nm steps, all possible two-band indices were calculated and their quality was evaluated as an indicator for the nitrogen supply by means of correlation matrices. The spectral measurements were carried out at defined measurement data for EC 32, EC 39 and EC 65 and then evaluated. In order to assess the quality of the indices, destructive data collections on plant populations in winter wheat were carried out parallel to the spectral measurements. Between the N-record and the indices PLSR, YARA_ALS and REIP_700, coefficients of determination (R^2) of up to 0.9 were calculated.

In addition to the R^2 values, the saturation, i.e. the change in the measured values in comparison to the divergent nitrogen uptake of the plants, was also determined. Particularly high saturating vegetation indices were the NDVI and the SAVI.

Key words: vegetation indices, spectrale measurement, PLSR, Contour Maps, N-uptake

Einleitung und Zielsetzung

Bisher erfolgt die Ermittlung des Stickstoffdüngerbedarfs landwirtschaftlicher Kulturpflanzen hauptsächlich auf Basis von Bodenuntersuchungen (WENDLAND et al., 2018). Bei einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung geraten Bodenuntersuchungssysteme wegen des hohen Arbeits- und Analyseaufwands schnell an Grenzen. Reflexions-sensorsysteme hingegen erlauben eine schnelle und zerstörungsfreie Analyse des Pflanzenbestandes. Um die

Affiliation

Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Freising

Kontaktanschriften

Mathias Westermeier, Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Liesel-Beckmann-Str. 2, 85354 Freising, E-Mail: mathias.westermeier@tum.de

Dr. Franz-Xaver Maidl, Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme, Liesel-Beckmann-Str. 2, 85354 Freising, E-Mail: maidl@wzw.tum.de

Zur Veröffentlichung angenommen

27. Juni 2019

unerwünschten Störgrößen weitgehend zu eliminieren und möglichst eindeutige reproduzierbare Informationen über einen Pflanzenbestand zu generieren, werden sogenannte Vegetationsindizes gebildet (BANNARI et al., 1995; REUSCH, 1997b). Einfache Spektralindizes lassen sich durch Bildung von Differenzen und Quotienten der Reflexionssignatur bestimmter Wellenlängen berechnen (KURZ, 2003; SCHÄCHTL, 2004). Neben der möglichst exakten Abbildung von Bestandesmerkmalen wie Stickstoffaufnahme und Biomassebildung ist die Stabilität gegenüber diversen Umwelteffekten (Strahlung, Sonnenstand, Blattfeuchte) sowie eine Sortenunabhängigkeit von immenser Bedeutung (SCHMID et al., 2005; MAIDL, 2011b; SCHMIDHALTER, 2015).

In der vorliegenden Studie sollten anhand der Reflexion von elektromagnetischen Wellen im sichtbaren und nahinfraroten Wellenlängenbereich Informationen über den aktuellen Stickstoffernährungsstatus in den gewählten EC-Stadien 32, 39 und 65 bei der Kulturart Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) analysiert werden.

Im Vordergrund stand außerdem eine Entwicklung eines Hyperspektral-Vegetationsindexes (PLSR) zur präzisen Schätzung und Abbildung der Stickstoffaufnahme. Das Datenmaterial wurde auf der Basis von Spektralmessungen eines Handspektrometers (tec5 AG, Oberursel) ermittelt.

Material und Methoden

Standort der Versuchsanlage

Die vorliegenden Untersuchungen zur Ermittlung der spektralen Reflexionssignatur und die daraus resultie-

renden Vegetationsindizes zur Abbildung von wichtigen Vegetationsparametern wurden in einem Stickstoffdüngungsversuch auf dem Versuchsgut Roggenstein der Technischen Universität München durchgeführt (48° 10' 44,9" N, 11° 19' 14,5" O).

Aufbau der Versuchsanlage

Der Versuch wurde als Exaktversuch mit einer Parzellendruckmaschine (Plotseed, Fa. Wintersteiger) in vierfacher Wiederholung, als Blockanlage am 14.10.2016 mit 300 Körner/m² ausgesät (Abb. 1). Es handelt sich um einen einfaktoriellen N-Düngungsversuch mit 16 N-Stufen (Tab. 1).

Als Sorte wurde die A-Winterweizensorte RGT Reform (RGT, Deutschland) gewählt. Jede Parzelle war als Doppelparzelle angelegt. Eine der beiden Parzellen diente zur Durchführung der Reflexionsmessungen und der Ernte mit dem Parzellenmähdrescher, während aus der anderen Parzelle die Biomasseproben zu EC 32, EC 39 und EC 65 gewonnen wurden.

Die Düngung erfolgte über alle Varianten hinweg mit NH₄NO₃ + CaCO₃ (Kalkammonsalpeter), der einen Stickstoffgehalt von 27% beinhaltet. Die jeweiligen Düngungszeitpunkte und N-Mengen sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Destruktive Datenerhebung

Die destruktive Datenerhebung bei Winterweizen erfolgte zu den charakteristischen EC-Stadien EC 32, EC 39 und EC 65. Zur Ermittlung des Frischmasse- und Trockenmasseaufwuchses zu EC 32 wurde aus einer Probeparzelle der oberirdische Biomasseaufwuchs von 1,2 m² (5 Pflanzenreihen mit einer Länge von 2 m) geschnitten.



Abb. 1. Luftaufnahme des Stickstoffdüngungsversuchs auf Gut Roggenstein, die untersuchte Fläche ist rot umrahmt

Tab. 1. Düngevarianten des Stickstoffsteigerungsversuches in Weizen

Düngevariante	Düngung [kg N/ha] zum Termin			Düngermenge [kg N/ha]
	VB 13.3.2017	EC 31 – 32 27.04.2017	EC 39 26.05.2017	
1	0	0	0	0
2	60	0	0	60
3	60	0	40	100
4	60	0	80	140
5	60	40	0	100
6	60	40	40	140
7	60	40	80	180
8	60	80	0	140
9	60	80	40	180
10	60	80	80	220
11	100	70	0	170
12	60	90	60	210
13	60	55	85	200
14	80	65	70	215
15	55	100	90	245
16	30	115	65	210

(VB = Vegetationsbeginn)

Die Biomassebeprobung zu EC 39 und EC 65 erfolgte mit einem Biomassevollernter (Hege 12). Die Beprobungsfläche je Termin betrug 4,5 m². Die Bestimmung der N-Konzentration in der oberirdischen Biomasse sowie im Korn der Mähdruschprobe wurde mit einem NIRS – Analysegerät (DS2500, FOSS GmbH Hamburg) durchgeführt. Aus den Daten der Trockenmasse und der N-Konzentration konnte die N-Aufnahme berechnet werden.

Messgeräte zur nichtdestruktiven Pflanzenanalyse

Die Reflexionsmessungen wurden einen Tag vor oder einen Tag nach der Biomassebeprobung, jeweils zur Mittagszeit, wenn die Sonne den Meridian durchläuft, durchgeführt. Hierfür fand ein 2-Kanal-Spektrometer

(Tab. 2) der Firma tec-5 AG (Oberursel, Deutschland) Verwendung.

Mit einem Öffnungswinkel von 180° nach oben wird die globale Einstrahlung detektiert und mit einem senkrecht nach unten gerichteten Kanal, Öffnungswinkel 25°, die von der Sonneneinstrahlung verursachte Reflexion des Pflanzenbestandes gemessen.

Die spektrale Reflexionssignatur errechnet sich somit aus der Rückstrahlung des Pflanzenbestandes, dividiert durch die globale Einstrahlung. Der gebildete Quotient wird im Anschluss auf geräteinterne Weißstandardwerte normalisiert und korrigiert. Auf Grundlage der ASCII-Datei des spektralphotometrischen Sensors wurden die einzelnen Reflexionswerte in ein Tabellenkalkulationsblatt von Excel 2010 importiert. Ausgehend davon konnte

Tab. 2. Technische Daten des Spektrolsensorsystems tec5

Baukomponenten	Technische Eigenschaften
Sensorelemente	Zweikanalig: Messkanal mit Öffnungswinkel 25 ° Referenzkanal mit Öffnungswinkel 180 °
Spektralbereich	360–1050 nm Auflösung mit 2,8 nm
Integrationszeit (Ansprechzeit)	frei wählbar zwischen 4 ms und 6 sec Dynamikbereich 32000 Counts
Datenausgabe	ASCII – Format

Tab. 3. Vegetationsindizes, die in der Studie eingesetzt wurden

Vegetationsindex	Formeln	Beziehung zu	Referenz
IR/R Ratio infrared/red	R_{780}/R_{670}	Oberirdischen Biomasse	PEARSON und MILLER (1972)
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670}}$	Biomasse	ROUSE et al. (1974)
SAVI Soil Adjusted Vegetation Index	$1,5 \times \frac{R_{780} - R_{670}}{R_{780} + R_{670} + 0,5}$	Biomasse	HUETE (1988)
REIP 700 Red Edge Inflection Point	$700 + 40 \frac{0,5 \times (R_{670} - R_{780}) - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$	Chlorophyllgehalt/N-Gehalt N-Aufnahme	GUYOT et al. (1988)
IR/G Ratio infrared/green	R_{780}/R_{550}	Chlorophyllgehalt/N-Gehalt	TAKEBE et al. (1990)
Yara_ALS	$100(\ln(R_{760}) - \ln(R_{730}))$	N-Aufnahme	JASPER et al. (2009)

die Verrechnung verschiedener Wellenlängen, in Abhängigkeit der zu betrachtenden Vegetationsindizes (Tab. 3) vorgenommen werden.

Partial Least Squares Regression (PLSR)

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Hyperspektral – Vegetationsindex (PLSR) zur exakten Abschätzung des Stickstoffversorgungsstatus von Weizenpflanzen und deren agronomisch wichtigen Vegetationsparametern.

Auf der Basis von detektierten Reflexionsspektren des Spektrolsensorysystems tec5 wurde ein Spektralbereich von 400–850 nm ausgewählt. Die Analysemethode PLSR wird primär zur Entdeckung von fundamentalen Zusammenhängen zwischen Variablen verwendet (ALBERS et al., 2009).

Die Vorgehensweise lässt sich dadurch erklären, dass zuerst Wellenlängen (X) im Spektralbereich 400–850 nm identifiziert werden, die eine bestmögliche Korrelation mit den Zielparametern besitzen. Diese Datenpunkte werden als T-Werte bezeichnet (MEVIK und WEHRENS, 2007). Anschließend erfolgte die Gewichtung der Wellenlängen zu den Zielparametern z.B. N-Aufnahme. Die Werte der Gewichtungen geben also Auskunft über die Abhängigkeit der Variablen zu den Hauptkomponenten. Diese Gewichtung, auch als U-Wert deklariert, wird mit T über eine Konstante in Beziehung gebracht. Durch das Maximieren der Kovarianz zwischen den einzelnen Wellenlängen (X) und den Zielparametern (Y), wird idealerweise eine lineare Beziehung zwischen T und U hergestellt. Mithilfe der Anzahl der Hauptkomponenten (Anzahl an Variablen) sollte die Varianz erklärt und eine Differenzierung innerhalb der verschiedenen Düngevarianten dargestellt werden können (MEVIK und WEHRENS, 2007). Eine multivariate Hauptkomponentenanalyse bündelt bzw. komprimiert die abhängigen Variablen und deren Infor-

mationen zu einigen, wenigen zentralen Faktoren, den Hauptkomponenten (ALBERS et al., 2009).

Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Daten fanden das Kalkulationsprogramm Excel 2010 und die Statistiksoftware R Verwendung (ANONYM).

Die Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleiches nach Tukey sind im Ergebnisteil neben den Versuchsergebnissen angegeben. Unterscheiden sich die Prüfglieder nicht signifikant voneinander, wurden diese mit demselben Buchstaben gekennzeichnet.

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der ausgegebenen Regressionsgleichungen, wurde der mittlere quadratische Fehler (RMSE, %-Wert) berechnet. Die Vorhersage gilt als hervorragend mit RMSE-Werten von < 10% gut, wenn 10–20% und ausreichend wenn > 30% erreicht wird (LOAGUE und GREEN, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

- P_i Vorhergesagter Wert
 O_i Beobachteter Wert
 n Anzahl der Messungen
 \bar{O} Mittelwert der beobachteten Werte

Ergebnisse

Reflexionssignatur von Winterweizen

Von zentraler Bedeutung für die spektrale Fernerkundung ist die Reflexionssignatur in Abhängigkeit der Wellenlängen. Eine unterschiedliche Applikationsmenge an

Stickstoff hat neben den visuell sichtbaren Unterschieden, auch eine Veränderung der Reflexionssignatur im Nahinfrarotbereich zur Folge. Zur Darstellung der unterschiedlichen Reflexionsspektren zu EC 32 erfolgten Spektralmessungen an verschiedenen gedüngten Weizenbeständen zu Vegetationsbeginn (Abb. 2).

Beobachtet wird eine höhere Remission im blauen bis roten Wellenlängenbereich bei abnehmendem N-Angebot. Im Gegenzug steigt die Reflexion im nahinfraroten Bereich mit zunehmendem Düngenniveau. Ein Charakteristikum für grüne Pflanzen ist der steile Anstieg des Reflexionsgrades am Übergang des sichtbaren Lichtes zur infraroten Strahlung.

Eignung der Spektralindizes zur Abbildung der N-Aufnahme

Um die Eignung der verschiedenen Indizes zur Abbildung der N-Aufnahme in Abhängigkeit der Vegetationsstadien von Winterweizen zu vergleichen, wurden die linearen Regressionsgeraden der einzelnen Indizes gegenübergestellt (Abb. 3). Dazu wurden alle 16 verschiedenen Düngeregime in die Berechnung aufgenommen. Zur Beurteilung der Güte eines einzelnen Index zur Abschätzung der Stickstoffaufnahme ist nicht nur das Bestimmtheitsmaß von Relevanz, sondern auch der Verlauf der Geraden, insbesondere der daraus abgeleiteten Steigungen.

Bei der Betrachtung der einzelnen Spektralindizes über alle Messtermine, ist zum Stadium EC 32 ein steiler Anstieg der Kurven in einem N-Aufnahmebereich von 0 bis 70 kg N/ha zu verzeichnen (A-F). Im Laufe der Vegetationsperiode, mit ansteigender Stickstoffaufnahme der Weizenbestände, verringerten sich die Steigungen der Regressionsgeraden (Abb. 3).

Bereits zu EC 39 konnte bei NDVI und, SAVI (E, F) bei gut versorgten Beständen (> 130 kg N/ha) ein Trend der Sättigung festgestellt werden. Andere Indices zeigten zu

EC 39 keine Sättigung. In EC 65 waren bei den Indices IR/G und besonders bei IR/R Sättigungseffekte feststellbar. Der PLSR als auch der REIP_700 (A, G) hingegen zeigten auch bei Stickstoffaufnahmen von über 150 kg N/ha Unterschiede auf. Ausgeprägte Sensitivitätsverluste sind ebenfalls zu Mitte der Blüte deutlich erkennbar (Abb. 3), an der geringen Veränderung der Wertebereiche über einen weiten N-Aufnahmebereich der Weizenbestände von 150–300 kg N/ha (E, F).

Geeignet für die Abschätzung der Stickstoffaufnahme in späteren Entwicklungsstadien sind gemäß der (Abb. 3) die Indizes PLSR und REIP_700. NDVI- und SAVI Werte konnten zu EC 65 zwar die N-Aufnahme mit R²-Werten von größer 0,5 abbilden, jedoch war eine Differenzierung von praxisüblichen N-Aufnahmemengen von 200 kg N/ha nicht möglich.

Hinsichtlich der Eignung von Spektralindizes zur Abbildung der N-Aufnahme in die oberirdische Biomasse wurden mithilfe eines linearen Regressionsansatzes zuzüglich zum Bestimmtheitsmaß (R²) der jeweilige RMSE-Wert (%) berechnet. Zu Beginn der Messungen zu EC 32, unabhängig von den einzelnen Indizes, konnten Determinationskoeffizienten im Mittel aller Messungen von 0,76 und ein Schätzfehler von 12% ermittelt werden (Tab. 4). Hohe Korrelationswerte erwies der Vegetationsindex REIP_700 zu Beginn des Schossens mit einem R² von 0,79 und einem RMSE-Wert von 11,86%. Dahingegen fiel der NDVI mit R²-Werten von circa 0,74 und einem durchschnittlichen Schätzfehler von über 12% nicht wesentlich schlechter aus.

Die Bestimmtheitsmaße der Indizes haben vergleichend zu EC 32 in EC 39 eine gesteigerte Güte von circa 11%. Eine besonders gute Abbildung der N-Aufnahme konnte zu Ende des Schossens mit Regressionswerten von über 0,94 und einem RMSE-Wert von 7% der Hyperspektral-Index PLSR konstatieren. Mit einer Ungenauigkeit von mehr als 14% zeigten der NDVI und SAVI einen

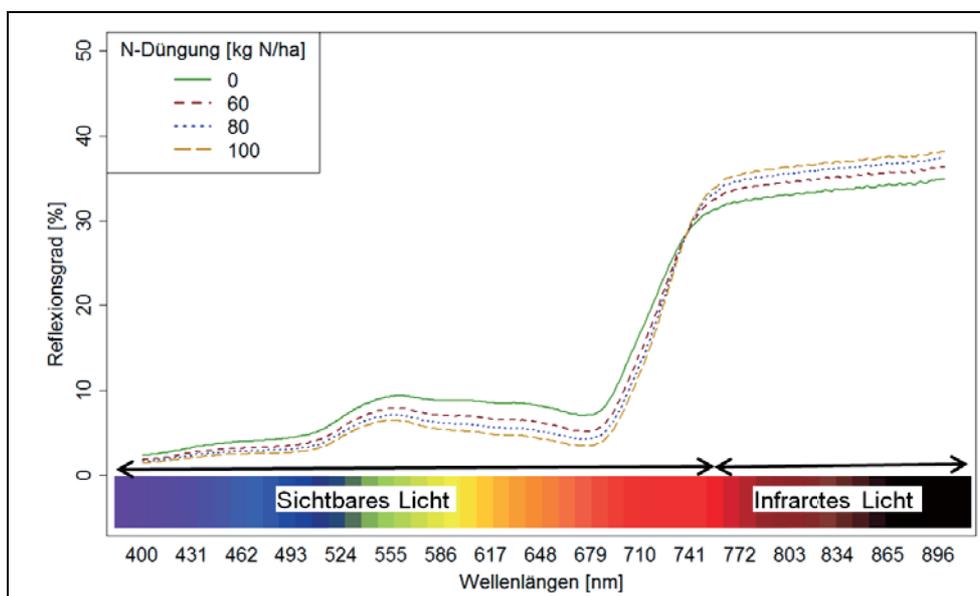


Abb. 2. Reflexionsspektren von Winterweizen mit unterschiedlicher Stickstoffdüngung zu Vegetationsbeginn (Messtermin EC 32)

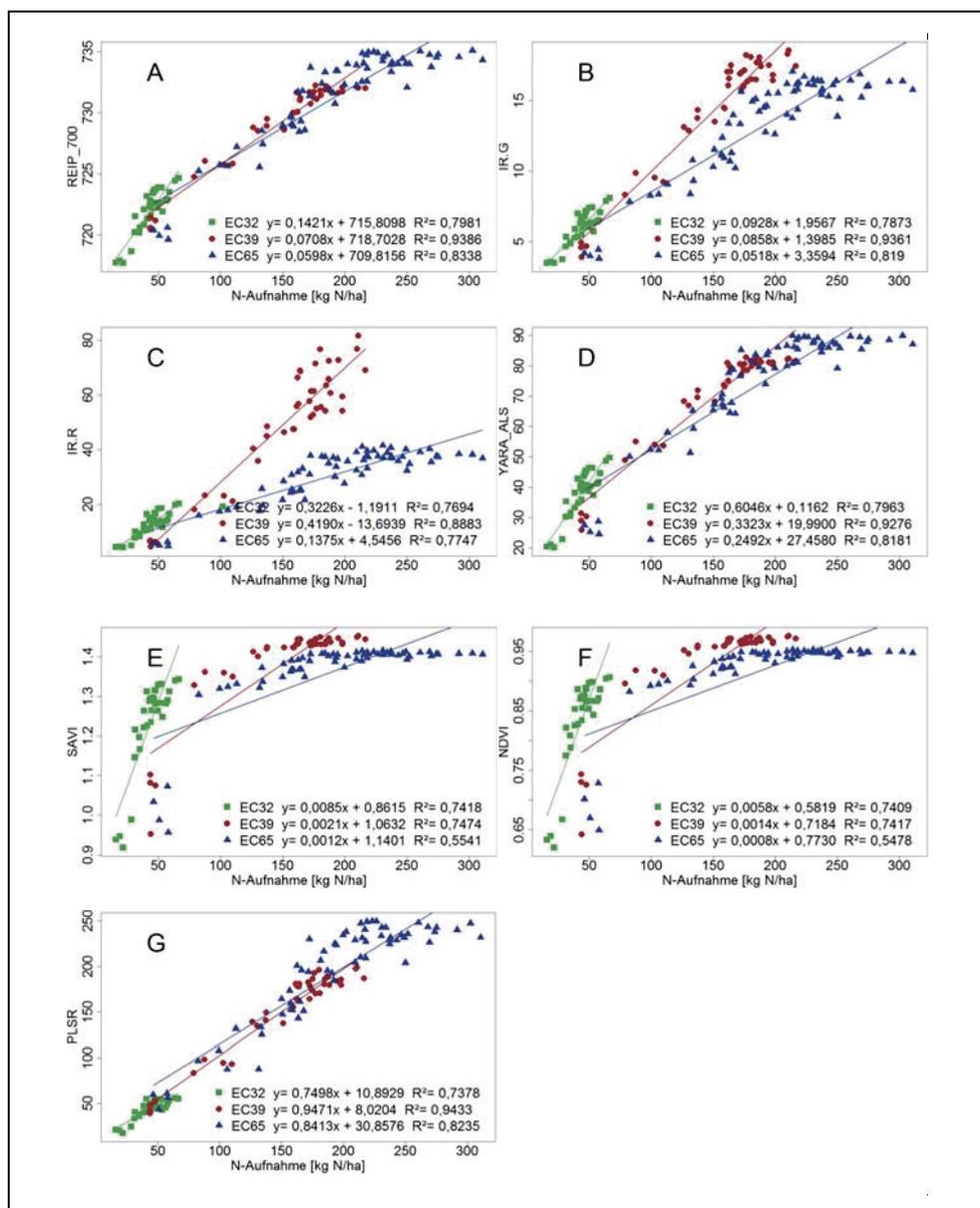


Abb. 3. Regressionsgeraden und Bestimmtheitsmaße zwischen der Stickstoffaufnahme und den Spektralindizes zu EC 32 (grün), EC39 (rot) und EC 65 (blau)

geringeren Zusammenhang zur N-Aufnahme auf. Besonders durch die frühen Sättigungseffekte ab einer N-Aufnahme von 130 kg N/ha stieg der prozentuale Fehleranteil an (Abb. 3). Daraus geht hervor, dass anhand des Bestimmtheitsmaßes keine konkrete Beurteilung für den Zusammenhang zwischen spektraler Messung und Parameter getroffen werden konnte.

Zu EC 65 ist gegenüber EC 39 ein Absinken der R^2 -Werte über alle Vegetationsindizes zu verzeichnen (Tab. 4). Mit der Zunahme der Seneszenz und der Abnahme des Blattgrüns konstatierten die Indizes NDVI und SAVI weiterhin die schwächste Beziehung, erkennbar an den geringen Bestimmtheitsmaßen von etwa 0,5 und den höchsten relativen Schätzfehlern von > 18%. In Bezug auf die Eignung eines Vegetationsindizes zur Abbildung der N-Aufnahme erreichten der PLSR und REIP_700 über alle Messtermine hinweg die geringsten RMSE und höchsten R^2 -Werte.

Zur Beurteilung der Unterscheidbarkeit der verschiedenen Düngestufen mit Hilfe von Vegetationsindizes wurde zum Termin EC39 ein multipler Mittelwertvergleich für die verschiedenen Indices durchgeführt (Tab. 5). Neben der Summe der gedüngten N-Mengen (kg N/ha) zu Vegetationsbeginn (VB) und zu EC 32 ist die tatsächliche N-Aufnahme (kg N/ha) der Weizenpflanzen zu EC 39 aufgelistet. Unterschiedliche Buchstaben zeigen sowohl für die N-Aufnahme als auch den jeweiligen Index signifikante Unterschiede an. Die Indizes PLSR, IR/G, IR/R und REIP_700 ergaben zu EC 39 die meisten signifikanten Unterschiede und daraus resultierend die höchste Sensitivität gegenüber der aufgenommenen N-Menge bis zu EC 39.

Eine geringe Differenzierung der N-Aufnahme zu EC 39 ergaben die Indizes NDVI und SAVI. Ab einer N-Aufnahme von 136 kg N/ha konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden, erkennbar an den identischen Signifikanzbuchstaben.

Tab. 4. RMSE- (%) und R²-Werte linearer Regressionen verschiedener Vegetationsindizes zur Stickstoffaufnahme in die oberirdische Biomasse von Winterweizen für die Stadien EC 32, EC 39 und EC 65

[kg N/ha]	linear	REIP_700	NDVI	IR/R	IR/G	SAVI	YARA_ALS	PLSR
N-Aufnahme	EC 32 R ²	0,7981	0,7409	0,7694	0,7873	0,7418	0,7963	0,7378
	RMSE (%)	11,86%	13,56%	12,51%	11,75%	12,68%	11,03%	12,02%
EC 39	R ²	0,9386	0,7417	0,8883	0,9361	0,7474	0,9276	0,9433
	RMSE (%)	7,69%	16,23%	10,10%	7,68%	15,18%	8,09%	7,08%
EC 65	R ²	0,8338	0,5478	0,7747	0,819	0,5541	0,8181	0,8235
	RMSE (%)	12,86%	21,21%	14,97%	13,42%	21,06%	13,45%	13,27%

Tab. 5. Mittelwertvergleich verschiedener Vegetationsindizes bei Winterweizen zu EC 39 in Abhängigkeit der Stickstoffaufnahme

EC 39	N-Düngung VB/EC 32 [kg N/ha]	N-Aufnahme EC 39 [kg N/ha]	REIP_700	NDVI	IR/G	IR/R	SAVI	YARA_ALS	PLSR
0/0	44,7 a	720,9 a	0,71 a	4,5 a	6,01 a	1,05 a	29,1 a	45,1 a	
60/0	94,7 b	725,6 b	0,91 b	9,2 b	21,4 b	1,35 b	52,9 b	92,2 b	
60/40	136,3 c	728,7 c	0,95 c	13,3 c	41,9 c	1,41 c	68,3 c	138,0 c	
60/55	154,3 d	729,9 d	0,96 c	14,8 d	52,5 cd	1,43 c	73,5 d	155,5 d	
60/80	168,5 de	731,3 e	0,96 c	16,5 e	57,5 de	1,43 c	78,8 e	175,3 e	
30/115	170,7 def	731,5 ef	0,97 c	16,8 e	57,5 de	1,43 c	80,1 e	178,0 ef	
60/90	194,8 f	731,9 ef	0,97 c	16,8 ef	58,3 def	1,43 c	80,8 e	180,7 ef	
55/100	182,2 ef	731,9 ef	0,97 c	17,6 ef	65,6 ef	1,44 c	81,5 e	186,8 ef	
100/70	196,0 f	732,1 f	0,97 c	18,2 f	74,0 f	1,45 c	82,3 e	194,3 f	

Eignung von Zwei-Band-Indizes zur Quantifizierung des Stickstoffstatus bei Winterweizen

Zur Bestimmung und Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen der N-Einlagerung in den Weizenbeständen und der einzelnen Zwei-Band-Indizes wurde für die jeweiligen Entwicklungsstadien eine Korrelationsmatrix aufgestellt (Abb. 4 und 5). Die Zwei-Band-Indices errechneten sich aus der Reflexion bei den auf der X-Achse aufgetragenen Wellenlängen dividiert durch die Reflexion bei den auf der Y-Achse aufgetragenen Wellenlängen. Anschließend wurden mithilfe von linearen Regressionsanalysen zwischen den verschiedenen Zwei-Band-Indices und der Stickstoffaufnahme von Weizen die R²-Werte bestimmt.

Zu EC 32 konnte eine Korrelation zur N-Absorption von maximal 0,79–0,8 detektiert werden. Dazu sind ausgewählte Reflexionsverhältnisse im nahinfraroten Bereich (750–850 nm) und roten Spektralbereich (700–750 nm) von besonderer Bedeutung. Zum Vergleich der beiden Zwei-Band-Indices von IR/G (R₇₈₀/R₅₅₀) und IR/R (R₇₈₀/R₆₇₀) wird deutlich, dass der Spektralquotient aus 780 nm und 500–570 nm höhere Korrelationen als im Bereich von 670 nm ergibt (Tab. 4).

Die höchsten Korrelationen zur Abbildung des N-Status der Weizenpflanzen errechneten sich zu EC 39 mit einem R²-Wert von 0,9447. Als geeignete Reflexionsverhältnisse zeichneten sich die Wellenlängen im Bereich 780–900 nm und 700–740 nm ab. Im Vergleich zu EC 32 verkleinerte sich der geeignete Spektralbereich, auch wenn eine gewisse Überschneidung der Bereiche sichtbar ist.

Durch das ungünstige Wellenlängenverhältnis von IR/R (780 nm und 670 nm) konnte ein Unterschied des Bestimmtheitsmaßes zu IR/G von 0,05 ermittelt werden (Tab. 4).

Diskussion

Reflexionssignatur von Winterweizen

Zunächst wurde deutlich, dass unterschiedliche applizierte Stickstoffmengen einen bedeutenden Einfluss auf die Ausprägung der Reflexionskurve haben. Danach waren bei schwach versorgten Weizenbeständen eine höhere Reflexion im sichtbaren Spektralbereich und eine Verringerung der Rückstrahlung im NIR-Bereich festzustellen (vgl. Abb. 2). Diese Beobachtung deckt sich

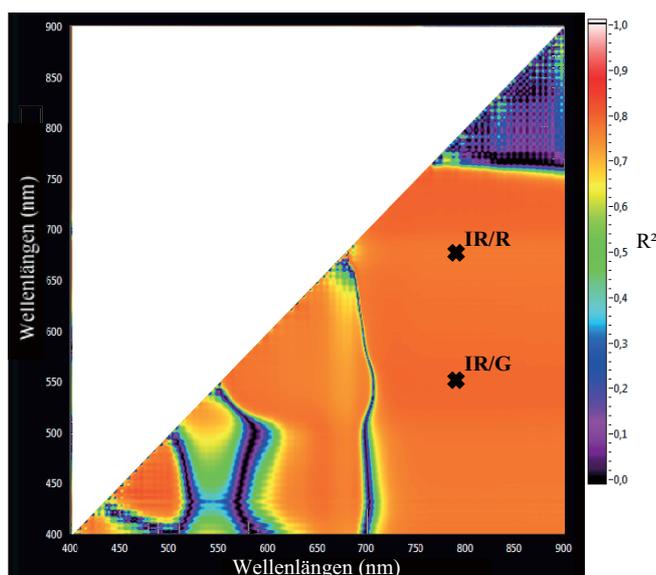


Abb. 4. Korrelationsmatrix zur Darstellung des Bestimmtheitsmaßes (R^2 linear) zwischen den einzelnen Spektralindizes und der Stickstoff-Aufnahme zu EC 32

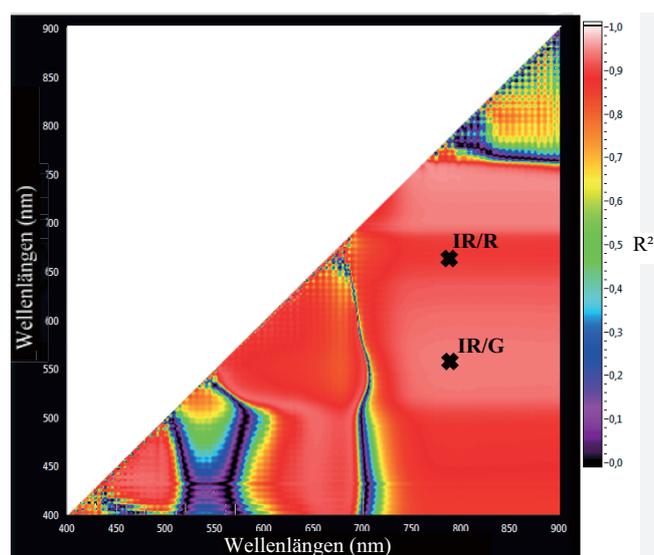


Abb. 5. Korrelationsmatrix zur Darstellung des Bestimmtheitsmaßes (R^2 linear) zwischen den einzelnen Spektralindizes und der Stickstoff-Aufnahme zu EC 39

mit zahlreichen wissenschaftlichen Forschungsarbeiten (HINZMAN et al., 1986; GOVIND et al., 2005; SHARABIAN et al., 2013).

Das geringe Reflexionsvermögen von hochversorgten Pflanzenbeständen im sichtbaren Reflexionsbereich war mit der zunehmenden Chlorophyllkonzentration und daraus resultierend, einer stärkeren Absorption des einfallenden Lichtes verbunden (HINZMAN et al., 1986; BUSCHMANN, 1993). Steigende Biomassemengen führten zu einer Zunahme der Reflexion im Spektralbereich von 680–750. SERRANO et al. (2003) und SCHÄCHTL (2004) erklären das mit geringer Absorption von Wellenlängen im Nahinfrarotbereich. Ebenfalls konnten Untersuchungen von HINZMAN et al. (1986) belegen, dass maximale Nahinfrarotreflexionen gleichzeitig mit einem maximalen Blattflächenindex auftraten.

Zur Abbildung der N-Aufnahme in Winterweizen durch Spektralindizes wurden lineare Schätzgleichungen ermittelt und deren Güte mit dem relativen Schätzfehler (RMSE-Wert) abgeglichen und bewertet. Bei der Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den Vegetationsindizes und der N-Aufnahme im Laufe der Vegetationsperiode, zeigten sich in frühen Entwicklungsstadien (EC 32) die geringsten R^2 - und höchsten RMSE-Werte. Als Ursache für die mäßige Abbildung der N-Aufnahme ist die geringe Bodenbedeckung verantwortlich (REUSCH, 1997; MAIDL, 2011b). Aufgrund der Störsignale des Bodens können Messergebnisse verfälscht und fehlgedeutet werden. Die Veränderung der reflexionsoptischen Messungen durch den Boden zeigten ebenfalls Untersuchungen von BARET und GUYOT (1991), NILSSON (1995) und QUEMADA und DAUGHTERY (2016). Höchste Korrelationswerte von $> 0,93$ und einem relativen Schätzfehler von $< 8\%$ wurden zum Messtermin Ende des Schossens ermittelt.

Die Abschätzung der N-Aufnahme im Mittel über alle Indizes erwies sich bei Winterweizen über alle Messtermine mit durchschnittlichen linearen R^2 -Werten von 0,78 und einem Schätzfehler von 14% als effektiv. Eine weitere Kenngröße zur Beurteilung der Güte von Indizes stellt der Sättigungseffekt dar. Besonders die Vegetationsindizes SAVI und NDVI waren über alle Messtermine hinweg nicht in der Lage gutversorgte Weizenbestände entsprechend zu differenzieren. Die ausgeprägten Sättigungseffekte zu praxisüblichen N-Düngermengen wurden auch von diversen vorangegangenen Untersuchungen bestätigt (SERRANO et al. 2003; GITELSON, 2004; SCHMID, 2007; ERDLER et al., 2011; SPICKER, 2016). Aus der Berechnungsformel hervorgehende Werte des NDVIs sind abhängig von der Absorption des Lichtes im roten und nahinfraroten Wellenlängenbereich (670 und 780 nm). Insbesondere bei 670 nm konnten bei mittleren bis hohen Chlorophylldichten nur sehr geringe und kaum veränderte Reflexionsgrade nachgewiesen werden. Resultierend daraus ergab das Verhältnis von $(R_{780}-R_{670})$ zu $(R_{780}+R_{670})$ bei hohen N-Aufnahmen annähernd gleiche Ergebnisse, da bei geringen Reflexionswerten im roten Spektralbereich, der Zähler als auch der Nenner hauptsächlich aus dem Wert der Reflexion im Nahinfrarot Bereich bestand (ERDLER et al., 2013). Aufgrund dessen pendelte sich der Wertebereich des NDVI bei gutversorgten Beständen auf einem konstanten Niveau zwischen 0,95 und 0,97 ein.

Vergleichbare Sättigungseffekte konnten ebenfalls bei dem Index SAVI festgestellt werden. Grund dafür ist die identische Verrechnung der Wellenlängen von 780 und 670 nm. Ein wesentlicher Unterschied zur Berechnungsformel des NDVIs ist die Eingliederung von empirisch festgelegten Korrekturfaktoren zur Minderung des Bodeneinflusses. Die geringe Sensitivität von SAVI und NDVI

gegenüber zunehmender N-Aufnahme konnte auch anhand der Mittelwertvergleiche und den relativ geringen Wertebereichen zu den EC-Stadien 39 und 65 belegt werden. Bei den Indizes IR/R und IR/G konnten ausgeprägte Sättigungseffekte erst ab einer N-Aufnahme von 170 kg N/ha zu EC 65 detektiert werden. Zurückzuführen auf die geringe Änderung der Reflexionswerte im roten Wellenlängenbereich. Jedoch nimmt bei gut versorgten Weizenbeständen der prozentuale Reflexionsanteil bei Wellenlängen von 670 und 780 nm gleichermaßen zu, sodass Sättigungseffekte stärker ausgeprägt sind. Zum praxistauglichen Einsatz von Spektralindizes unter Hohertragsbedingungen ist eine Unterscheidung von Düngegraden in einem Wertebereich von 180–240 kgN/ha wichtig. Nur so ist eine präzise Düngung möglich. Eine hohe Genauigkeit zur Abbildung der N-Aufnahme konnte von den Vegetationsindizes REIP_700, YARA_ALS und PLSR erreicht werden. Je nach Messstadium waren R^2 -Werte von $> 0,95$ und eine ausgeprägte Differenzierung auch im Bereich hoher N-Aufnahmen zu verzeichnen (Abb. 3). Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch FILLELA et al. (1995), SCHMID und MAIDL (2005), JASPER et al. (2009), PORTZ et al. (2012), LI et al. (2014). Die Auswertung ergab jedoch, dass mit verringerter Differenz zwischen den applizierten N-Mengen und demzufolge kleineren Unterschieden in der N-Aufnahme die Signifikanz deutlich abnahm und eine Unterscheidbarkeit nicht mehr gegeben war. Grund für hohe Korrelationen zwischen dem Index REIP_700 und der N-Aufnahme dürfte die sensitive Verschiebung der Hauptwendepunkte im nahinfraroten Bereich sein (REUSCH, 1997; SCHÄCHTL, 2004; LIEBLER, 2002; MARTINEZ und RAMOS, 2015).

Beim Index YARA_ALS verwendete Wellenlängen im Nahinfrarot-Bereich (730 und 760 nm) zeigen nach BUSCHMANN (1993) und SERRANO et al. (2003) eine Abhängigkeit von Chlorophyllkonzentration und der Menge an Biomasse. Dies hat zur Folge, dass mit höheren N-Applikationen sich die Absorption des eintreffenden Lichtes durch das Chlorophyll verstärkt und die Reflexionswerte im Spektralbereich von 730 nm absinken. Dagegen nimmt der Reflexionsgrad durch die steigende Biomasse im Wellenlängenbereich von 760 nm zu. Anhand der Eingliederung der ermittelten Reflexionswerte in eine logarithmische Funktion wird mit zunehmenden Reflexionsgraden die relative Zunahme verkleinert, sodass die Gewichtung der Reflexion von 760 nm vermindert wird. Daraus resultierend ergibt sich eine sukzessiv geringere Einbeziehung der Biomassenentwicklung in die Berechnungsformel (vgl. Tab. 1). Durch die gegensätzlich verlaufenden Reflexionsgrade bei den erwähnten Wellenlängen in hoch versorgten Weizenbeständen, war auch eine gute Differenzierung der N-Aufnahmeraten möglich (JASPER et al., 2009).

Als weiterer Index stellte der Hyperspektral-Vegetationsindex PLSR ein potenziell robustes Verfahren dar. Durch die Bereitstellung eines Regressionsmodells, in dem der gesamte spektrale Datensatz in einem gewichteten Verhältnis eingeht, können verschiedene Kulturen, Wachstumsstadien und Standorte berücksichtigt werden

(LI et al., 2014). Außerdem erfolgte durch die Gewichtung der Wellenlängen eine Detektion von Schlüsselwellenlängen, die verantwortlich für eine hohe Korrelation zur N-Aufnahme und auch Sättigungseffekte bei hohen N-Applikationen weitgehend reduzierte. Die Auswertung des einjährigen Versuchs ermöglichte jedoch mit der PLSR-Analyse in der vorliegenden Arbeit keine signifikant bessere Erfassung der Stickstoffaufnahme von Weizen im Vergleich zu bekannten guten Indices, wie beispielsweise den REIP.

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zweier Wellenlängen mit der N-Aufnahme der Pflanzen wurden sogenannte Konturkarten angefertigt (Abb. 4 und 5). Auffällig bei der Betrachtung der Korrelationsmatrizen über alle Messtermine ist der identische Farbverlauf mit weitgehend gleichbleibenden Korrelationswerten. Das Verhältnis von nahinfraroten Reflexionsbanden von 750–900 nm zu 710–730 nm ergab die höchste Beziehung zur N-Aufnahme. Nach CHEN et al. (2010) werden die Wellenlängen 710–730 nm vom Chlorophyllgehalt und dem Blattflächenindex beeinflusst, während der Infrarot-Bereich (750–900 nm) auf den N-Gehalt reagiert (ZHU et al., 2007; YAO et al., 2014). Der Spektralbereich 520–550 nm wird überwiegend von der Chlorophyllkonzentration bestimmt (BUSCHMANN, 1993). XUE et al. (2004) fanden ebenfalls eine gute Korrelationen zur Abbildung der N-Aufnahme mit einem Reflexionsverhältnis von 860 zu 560 nm. Eine Beziehung der Spektralindizes und der N-Aufnahme konnte zum Stadium EC 39 mit $> 0,95$ detektiert werden, wobei im Gegenzug zu EC 32 und EC 65 Bestimmtheitsmaße von $< 0,85$ erreicht wurden.

Interessant zu beobachten war außerdem der geringe Zusammenhang zwischen der N-Aufnahme und dem sichtbaren Spektralbereich von 520–580 nm zu 400–510 nm zu allen EC-Stadien (vgl. Abb. 4 und 5). In mehreren wissenschaftlichen Arbeiten wurden bereits Photochemical-Reflexions-Indizes (PRI) im sichtbaren Spektralbereich untersucht (NILSSON, 1995; SIMS und GAMON, 2002; RASMUSSEN et al., 2015). Dabei wurden Beziehungen zum Xanthophyllprozess hergestellt (SIMS und GAMON, 2002). Anhand der Konturkarten konnte auch bewiesen werden, dass mit der visuellen Bonitur des menschlichen Auges keine eindeutige Aussage über den Versorgungszustand der Pflanzenbestände getroffen werden kann. Beweis dafür sind die geringen Korrelationen im sichtbaren Spektralbereich.

Schlussfolgerung

Insbesondere durch die hyperspektrale Verrechnung von Wellenlängen konnten insgesamt gute bis hervorragende Beziehungen zur N-Aufnahme hergestellt werden.

Die Versuchsdauer von einem Jahr ermöglichte den Nachweis der Effektivität der untersuchten Methodik. Sie sollte jedoch in mehrjährigen Versuchen validiert werden. Anhand eines solch kurzen Zeitraumes kann keine allgemein gültige Schlussfolgerung für folgende Jahre formuliert werden. Bei der Auswertung der Messdaten sind neben dem Regressionsverfahren auch die verwendeten Düngegraden, die in der Studie bewusst eng gewählt

wurden, um die Grenzen der Untersuchungen zur ermitteln, für den Erfolg eines Index verantwortlich. Für die Optimierung der Düngung ist von ebenso großer Bedeutung eine signifikante Differenzierung im Bereich hoher N-Aufnahmemengen (200–240 kgN/ha). Viele der untersuchten Spektralindizes konnten lediglich N-Aufnahmemengen bis 130 kg N/ha bei EC 39 und 170 kg N/ha zum Messtermin EC 65 detektieren. Darüber hinaus zeigten sich Sensitivitätseffekte, so dass für diese Bestände keine Aussage abgeleitet werden kann.

Literatur

- ALBERS, S., D. KLAPPER, U. KONRADT, A. WALTER, J. WOLF, 2009: Methodik der empirischen Forschung. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, s.l.: Gabler DOI: 10.1007/978-3-322-96406-9.
- BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN, 1995: A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing in Environment* **13**, 95–120.
- BARET, F., G. GUYOT, 1991: Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment. *Remote Sensing of Environment* **35** (2-3), 161–173, DOI: 10.1016/0034-4257(91)90009-U.
- BUSCHMANN, C., 1993: Fernerkundung von Pflanzen – Ausbreitung, Gesundheitszustand und Produktivität. *Die Naturwissenschaften* **80**, 439–453.
- CHEN, P., D. HABOUDANE, N. TREMBLAY, J. WANG, P. VINCEAULT, B. LI, 2010: New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen in corn and wheat. *Remote Sensing in Environment* **114** (9), 1987–1997, DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.006.
- ERDLE, K., B. MISTELE, U. SCHMIDHALTER, 2011: Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research* **124** (1), 75–84, DOI: 10.1016/j.fcr.2011.06.007.
- ERDLE, K., B. MISTELE, U. SCHMIDHALTER, 2013: Spectral assessments of phenotypic differences in spike development during grain filling affected by varying N supply in wheat. *Journal of Plant Nutrition* **176**, 952–963, DOI: 10.1002/jpln.201300247.
- FILLELLA, I., L. SERRANO, J. SERRA, J. PENUELAS, 1995: Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop science* **35**, 1400–1405.
- GITELSON, A.A., 2004: Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology* **161** (2), 165–173, DOI: 10.1078/0176-1617-01176.
- GITELSON, A.A., M.N. MERZLYAK, H.K. LICHTENTHALER, 1996: Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. *Journal of Plant Physiology* **148** (3-4), 501–508, DOI: 10.1016/S0176-1617(96)80285-9.
- GOVIND, A., M. BHAVANARAYANA, J. KUMARI, A. GOVIND, 2005: Efficacy of different indices derived from spectral reflectance of wheat for nitrogen stress detection. *Journal of Plant Interactions* **1** (2), 93–105, DOI: 10.1080/17429140500396958.
- GUYOT, G., F. BARET, D.J. MAJOR, 1988: High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and infrared. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **11**, S. 750–760.
- HINZMAN, L.D., M.E. BAUER, C.S.T. DAUGHTERY, 1986: Effects of Nitrogen Fertilization on Growth and Reflectance Characteristics of Winter Wheat. *Remote Sensing in Environment* **19** (1), 47–61, DOI: 10.1016/0034-4257(86)90040-4.
- HUETE, A.R. 1988: A soil-adjusted vegetation index (SAVI). In: *Remote Sensing in Environment* **25**, S. 89–105.
- JAGO, R.A., M.E.J. CUTLER, P.J. CURRAN, 1999: Estimating Canopy Chlorophyll Concentration from Field and Airborne Spectra. *Remote Sensing of Environment* **68** (3), 217–224, DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00113-8.
- JASPER, J., S. REUSCH, A. LINK, 2009: Active sensing of the Nstatus of wheat using optimized wavelength combination impact of seed rate, variety and growth stage. Conference, Precision agriculture 2009, In: *European Conference On Precision Agriculture*, S. 23–30.
- KURZ, F., 2003: Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Dissertation. Technische Universität, München.
- LI, F., B. MISTELE, Y. HU, X. CHEN, U. SCHMIDHALTER, 2014: Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal Agronomy* **52** (Part B), 198–209, DOI: 10.1016/j.eja.2013.09.006.
- LIEBLER, J., 2002: Feldspektroskopische Messungen zur Ermittlung des Stickstoffstatus von Winterweizen und Mais auf heterogenen Schlägen. Dissertation. Technische Universität, München.
- LING, Z., Z. DAZHOI, L. DONG, Z. BAOHUA, W. CHENG, Z. CHUNJIANG, 2015: Winter wheat biomass estimation based on canopy spectra. *International Journal Agriculture and Biological Engineering* **8** (6), 30–36, DOI: 10.3965/j.ijabe.20150806.1311.
- LOAGUE, K., R.E. GREEN, 1991: Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* **7** (1-2), 51–73, DOI: 10.1016/0169-7722(91)90038-3.
- MAIDL, F.-X., 2011a: Voraussetzungen für eine sensorgesteuerte teilflächenspezifische N-Düngung. In: CLASEN, M., G. FRÖHLICH, H. BERNHARDT, K. HILDEBRAND, B. THEUVSEN, *Referate der 32. GIL-Jahrestagung in Freising 2012 – Informationstechnologie für eine nachhaltige Landwirtschaft*, 199–202.
- MAIDL, F.-X., 2011b: Verfahren zur Bestimmung des Düngedarfs, insbesondere des Stickstoffdüngedarfs und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Dt. Patentschrift DE 10 2011 001 096.3.
- MARTINEZ, L.J., A. RAMOS, 2015: Estimation of chlorophyll concentration in maize using spectral reflectance. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **40-7/W3**, 65–71.
- MEVİK, B., R. WEHRENS, 2007: The pls Package: Principal Component and Partial Least Squares Regression in R. *Journal of Statistical Software* **18** (2), DOI: 10.18637/jss.v018.i02.
- NILSSON, H.-E., 1995: Remote Sensing and image Analysis in Plant Pathology. *Annual Review of Phytopathology* **33**, 489–527, DOI: 10.1146/annurev.py.33.090195.002421.
- PORTZ, G., J.P. MOLIN, J. JASPER, 2012: Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture* **13** (1), 33–44, DOI: 10.1007/s11119-011-9243-4.
- PEARSON, R.L., L.D. MILLER, 1972: Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. In: *Proceedings of the 8th international symposium on Remote sensing of the Environment*, S. 1355–1379.
- QUEMADA, M., C.S.T. DAUGHTERY, 2016: Spectral Indices to Improve Crop Residue Cover Estimation under Varying Moisture Conditions. *Remote Sensing* **8**, DOI: 10.3390/rs8080660.
- RASMUSSEN, I.S., D.B. DRESBOLL, K. THORUP-KRISTENSEN, 2015: Winter wheat cultivars and nitrogen (N) fertilization – Effects on root growth, N uptake efficiency and N use efficiency. *European Journal Agronomy* **68**, 38–49, DOI: 10.1016/j.eja.2015.04.003.
- REUSCH, S., 1997: Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturen. Dissertation. Christian Albrecht Universität, Kiel.
- ROUSE, J.W., R.H. HAAS, A.J. SCHELL, W. DEERING, J.C. HARLAN, 1974: Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. In: *NASA-GSFC Final Report 3*.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (HG.), 2007: BEFU – Teil ökologischer Landbau. Methoden der Bilanzierung und Düngungsbeurteilung, Verfahrensbeschreibung und PC-Anleitung. Dresden.
- SCHÄCHTL, J., 2004: Sensorgestützte Bonitur von Aufwuchs und Stickstoffdüngung bei Weizen- und Karoffelbeständen. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- SCHMID, A., 2007: Erfassung des aktuellen Stickstoffstatus von Kulturpflanzen mit berührungsloser Sensorik zur Optimierung der teilflächenspezifischen Bestandesführung. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- SCHMID, A., F.-X. MAIDL, G. HUBER, 2005: Möglichkeiten der Schätzung des Biomasseaufwuchs von Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) mittels Spektrometer. Online verfügbar unter http://oekolandbau.wzw.tum.de/Lit_lehrst/pdf-Dateien/Biomasse_Giessen.pdf, zuletzt geprüft am 05.07.2018.
- SCHMID, A., F.-X. MAIDL, 2005: Einflussfaktoren auf spektrale Reflexionssignaturen zur Bonitur der Biomasse und des Stickstoffstatus von Winterweizen. Hg. v. Lehrstuhl für Ackerbausysteme und Ökologischen Landbau. Technische Universität München.
- SCHMIDHALTER, U., 2015: Sensorgestützte Ermittlung des Nährstoffbedarfs. *VDLUFA-Schriftreihe* **70**, 57–66.
- SERRANO, L., I. FILELLA, J. PENUELAS, 2000: Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science* **40**, 723–731.
- SERRANO, L., I. FILELLA, J. PENUELAS, 2003: Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. In: *Crop science* **40**, S. 725–731.

- SHARABIAN, V.R., N. NOGUCHI, K. ISHI, 2013: Optimal Vegetation Indices for Winter Wheat Growth Status Based on Multispectral Reflectance. *Environment Control Biology* **51** (3), 105–112, DOI: 10.2525/ecb.51.105.
- SIMS, D.A., J.A. GAMON, 2002: Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structure and developmental stages. *Remote Sensing* **81** (2-3), 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
- SPICKER, A., 2016: Entwicklung von Verfahren zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zu Wintergerste (*Hordeum vulgare* L.) und Winterraps (*Brassica napus* L.) auf Grundlage reflexionsoptischer Messungen. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- TAKEBE, M., T. YONEYAMA, I. INADA T. MURAKAMI, 1990: Spectral reflectance ratio of rice canopy for estimating crop nitrogen status. In: *Plant and Soil* **122**, S. 295–297.
- WENDLAND, M., M. DIEPOLDER, P. CAPRIEL, 2012: Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. 10. Aufl. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan.
- WENDLAND, M., M. DIEPOLDER, K. OFFENBERGER, S. RASCHBERGER, 2018: Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland. 14. Aufl. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan.
- XUE, L., W. CAO, W. LUO, T. DAI, Y. ZHU, 2004: Monitoring leaf-nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance. *Agronomy Journal* **96** (1), 135–142, DOI: 10.2134/agronj2004.1350.
- YAO, X., H. REN, Y. TIAN, W. CAO, Y. ZHU, T. CHENG, 2014: Detecting leaf nitrogen content in wheat with canopy hyperspectrum under different soil backgrounds. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **32**, 114–124, DOI: 10.1016/j.jag.2014.03.014.
- YAO, X., Y. ZHU, Y. TIAN, W. FENG, W. CAO, 2010: Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat. *Irish Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **12** (2), 89–100, DOI 10.1016/j.jag.2009.11.008.
- ZHU, Y., Y. TIAN, X. YAO, X. LIU, W. CAO, 2007: Analysis of Common Canopy Reflectance Spectra for Indicating Leaf Nitrogen Concentrations in Wheat and Rice. *Plant Production Science* **10** (4), 400–411, DOI: 10.1626/ppp.10.400.

© Der Autor/Die Autorin 2019.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2019.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).