

Spektrale Erfassung von Merkmalen der Stickstoffeffizienz bei Winterweizen

L. Prey, Y. Hu, U. Schmidhalter

Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Technische Universität München

1 Einleitung

Mit der zunehmenden Regulierung der Stickstoffdüngung im Pflanzenbau sowie stärkerem Einfluss des Klimawandels wird die Steigerung der Stickstoffeffizienz (NE) in der Qualitätsweizenerzeugung und damit die Selektion Stickstoff-effizienter Genotypen noch bedeutsamer (Garnett et al., 2015). Während bei Kulturen wie Mais die reine Selektion nach hoher Biomasse ausreichend sein kann, ist bei Weizen die gleichzeitige Berücksichtigung der Backfähigkeit entscheidend. Nach wie vor wird hierfür in der Praxis der Rohproteingehalt im Korn verwendet. Dieser lässt sich leicht mit dem Kornertrag zur Stickstoffaufnahme (NA) des Ernteprodukts erweitern, welche in engem Zusammenhang zur Stickstoffaufnahmeeffizienz (NauEff) der gesamten Pflanze steht. Dadurch ergibt sich die Definition der Stickstoffeffizienz als Produkt von Stickstoffaufnahme- und Stickstoffnutzungseffizienz (NutEff): $NE = \text{NauEff} * \text{NutEff}$ (Moll et al., 1982).

Bei einheitlicher Stickstoffdüngung kommt somit die Betrachtung des Kornertrages der der NE gleich, sollte aber um die Kornstickstoffaufnahme erweitert werden, um überschüssigen Stickstoff und damit das Verlustpotential abschätzen zu können. Die Stickstoffeffizienz lässt sich aus verschiedenen



Abb. 1: TM- und N- Komponenten, die in zeitlicher Reihenfolge zu Kornertrag und Stickstoffaufnahme beitragen

Spektrale Methoden kommen seit einigen Jahren zur Erfassung von Biomasse (TM) und Stickstoffaufnahme (NA) im Präzisionspflanzenbau zum Einsatz (Ali et al., 2016; Mistele und Schmidhalter, 2006). Ähnliche Methoden könnten gleichermaßen zu einer effizienteren Phänotypisierung von Genotypen

beitragen, um gezielt die Stickstoffeffizienz zu detektieren (Araus und Cairns, 2014). Ziel dieser Untersuchung war es, Merkmale der Stickstoffeffizienz bei Linien- und Hybridwinterweizensorten hinsichtlich ihrer Bedeutung für Ertragsbildung und die NE zu quantifizieren und bezüglich ihrer spektralen Abschätzbarkeit zu vergleichen.

2 Material und Methoden

In einem 3-jährigen Sortenversuch in den Jahren 2014-2016 mit Linien- und Hybridwinterweizen am Standort Freising-Dürnast wurden organspezifische TM- und NA-Parameter zur Blüte und Endreife sowie spektrale Reflexionsmerkmale erfasst.

Dafür wurden je nach Zeitpunkt 30-60 ährentragende Halme geschnitten und in Blatt, Stängel und Ähre separiert. Die Flächenumrechnung erfolgte über die mit der aus Parzellen- und Einzelährenertrag berechneten Bestandesdichte. Ziel der Beerntung war die Beurteilung von TM-Bildung und NA in der vegetativen und generativen Phase sowie des Beitrags der Translokation (TL) zur Ertragsbildung. Um den Bezug der TM- und N-Merkmale zu späteren Zielmerkmalen beurteilen zu können, wurde die Korrelation der Merkmale verglichen. Für die Beerntung wurden 13 Sorten berücksichtigt, die in drei N-Stufen getestet wurden, darunter 4 Hybridsorten: N1 = 100 kg N/ha, N2 = 160 kg N/ha und N3 = 220 kg N/ha. 2015 wurde N1 nicht beerntet. Begleitend zur Beerntung fanden im 2. und 3. Jahr (2015 und 2016) Spektralmessungen mit der mobilen Multi-Sensorplattform *Phenotrac4* statt, die neben Sensoren mit eigener Lichtquelle (aktive Sensoren), wie sie auch zur Düngung eingesetzt werden, über ein passives hyperspektrales Spektrometer verfügt (Erdle et al., 2013). Von den aktiven Sensoren wurde ein Greenseker, CropCircle (CC) und Active Light Sensor (ALS) getestet (Kipp et al., 2014). 2015 wurde an 8 Terminen zwischen dem 12.06. (Milchreife) und dem 22.07. (späte Gelbreife) und 2016 an 13 Terminen zwischen 05.04. (Bestockung) und 10.07. (Gelbreife) spektral gemessen, um verschiedene Messtermine beurteilen zu können.

Es wurde die Möglichkeit der spektralen Abschätzbarkeit der Merkmale mit 70 klassischen Vegetationsindizes durch Bildung linearer Modelle für alle Kombinationen aus Indizes, Messterminen und Merkmalen getestet. Dazu wurden Modelle mit den Daten aller N-Stufen sowie jeweils innerhalb der drei

N-Stufen getestet. Für den jeweils besten Messtermin wurde als Vergleich das multivariate Verfahren der Partial Least Squares-Regression (PLSR) getestet. Hierzu wurde die spektrale Information des passiven Spektrometers von 400 nm bis 1000 nm verwendet. Die Auswertung erfolgte mit *R* sowie für die PLSR-Modelle mit der Software *Unscrambler*.

3 Ergebnisse

3.1 Komponenten der Ertragsbildung und N-Aufnahme

Im Mittel der drei Versuchsjahre wurde etwa zwei Drittel der Gesamtbiomasse bis zur Blüte gebildet. Dabei waren die Unterschiede nach Jahren ähnlich stark wie die zwischen den N-Stufen mit 9.7 t/ha 2014 bis 12.6 t/ha 2016. Im Durchschnitt wurden 28 % dieser Biomasse in das Korn verlagert, was in allen Jahren 36-37 % zum Kornertrag beitrug.

Dennoch zeigte weder die Blütemasse im Mittel der Korrelationen innerhalb der Jahr/N-Stufen-Kombinationen ($r = 0,23$) noch die daraus resultierende Biomasetranslokation ($r = n. s.$) im Mittel der drei Jahre nennenswerte Beziehungen zum Kornertrag (Tab. 1). Dieser war am stärksten von der Nachblüteassimilation beeinflusst ($r = 0,72$). Aufgrund geringerer Unterschiede im Harvest Index ließ sich der Kornertrag ebenfalls gut durch die Gesamtbiomasse abschätzen ($r = 0,88$).

Tab. 1: Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen Kornertrag und Korn-N-Aufnahme und den TM- und N- Komponenten: Mittelwerte der Korrelationen innerhalb von N-Stufen und Jahren. (NB.: Nach-Blüte, TL: Translokation, Eff.: Effizienz)

Kornertrag		Korn-N-Aufnahme	
Merkmal	Korrelation (r)	Merkmal	Korrelation (r)
TMBlüte	0,23	TMBlüte	0,48
NB-Ass.	0,72	N% Blüte	0,15
TMKornreife	0,88	NABlüte	0,57
Harvest-Index	0,64	NB-NA	0,52
TM-TL	n. s.	N-TL	0,56
TM-TL-Eff.	n. s.	N-TL-Eff.	0,20
		Kornertrag	0,77
		Korn-N-Konz.	0,35

Für die Korn-N-Aufnahme stellte stets der Anteil des aus der Vorblüteaufnahme translozierten Stickstoffs die wichtigste Komponente dar, der bei geringer N-Düngung am höchsten war (85 % in N1 gegenüber 81 % in N3). Nur in N1 wurde im Mittel der Jahre eine Abfuhr in Höhe der Düngung durch das Korn erreicht (105 kg N/ha), während in N2 nur 139 und in N3 167 kg/ha der gedüngten 160 bzw. 220 kg N/ha abgeführt wurden. Dabei wird deutlich, dass mit einigen Sorten bei der ortsüblichen Düngung von 220 kg N/ha keine ausreichende Abfuhr erreicht wurde, um die Grenze der durchschnittlich erlaubten N-Überschüsse von 50 kg N/ha zu erreichen. Eine Gruppierung nach Qualitätsgruppen, wie in der neuen Düngeverordnung berücksichtigt, lässt sich dabei nicht bestätigen. Innerhalb der Jahr*N-Stufen-Kombinationen zeigten die beiden direkten Komponenten Stickstofftranslokation (N-TL) und Nach-Blüte-N-Aufnahme im Durchschnitt Bezüge zur Korn-N-Aufnahme von $r = 0,56$ und $r = 0,52$. N-TL berechnet sich dabei aus dem Produkt von Trockenmasse zur Blüte und Stickstoffkonzentration zur Blüte (= NA zur Blüte) sowie der Translokationseffizienz. Diese zeigte keine Effekte der N-Düngung, jedoch gewisse Sortenunterschiede (bei den 3-jährig getesteten Sorten von 79 % in der Hybridelterlinie SUR.99820 bis 83 % bei Hystar). Auffallend war die geringere Entleerung des Strohs im stark von Krankheiten beeinflussten Jahr 2016 (75 % gegenüber 85 % in 2014).

3.2 Vergleich der spektralen Abschätzbarkeit

Für beide Versuchsjahre wurden lineare Modelle sowie PLSR-Modelle getestet. In beiden Jahren wurden meist bessere Bezüge für die N-Merkmale als für die vergleichbaren TM-bezogenen Merkmale gefunden (Tab. 2). Die Gesamt-NA zur Blüte war mit den besten Vegetationsindizes meist gut abschätzbar ($R^2 = 0,83$ und $0,86$ über die N-Stufen bzw. $0,60$ und $0,65$ im Durchschnitt innerhalb der N-Stufen in den Jahren 2015 und 2016). Dabei wurde über die N-Stufen ein RMSE von 7 bzw. 11 kg/ha erreicht. Für die einzelnen Organe wurden leicht schlechtere Bezüge gefunden, wobei in beiden Jahren die besten Bestimmtheitsmaße für die Blatt-NA ($R^2 = 0,84$ und $0,80$ über die N-Stufen) erreicht wurden. Das gleiche traf auch für die Bezüge mit Blatt-TM auf ähnlichem Niveau zu, während in beiden Jahren für Ähre (nicht dargestellt) und Stängel schlechtere Bestimmtheitsmaße erreicht wurden. TM-Translokation (max. $R^2 = 0,43$) und Nach-Blüte-Assimilation (nicht dargestellt, max. $R^2 = 0,52$) zeigten schlechte bis mittlere Bezüge, was an dem indirekten Charakter der Merkmale liegen könnte. Für Stickstoff hingegen ist die Translokation gut

erfassbar ($R^2 = 0,79$ und $0,81$ sowie $0,60$ und $0,57$ in beiden Jahren über sowie innerhalb der N-Stufen), da sie vor allem vom aufgenommenen Stickstoff abhängt, während Unterschiede in der Verlagerungseffizienz gering waren. Allerdings zeigte die Nach-Blüte-NA geringere Bezüge (nicht dargestellt, max. $R^2 = 0,54$ innerhalb der N-Stufen). Sie trug aber auch deutlich weniger zur gesamten NA bei (ca. 30 % 2015 und 13 % 2016). Sowohl Gesamt-TM als auch Gesamt-NA zur Endreife zeigten vergleichbare Bezüge wie zur Blüte. Ähnlich gut wie die Gesamt-NA konnte die Korn-NA erfasst werden, welche maßgeblich die abgeführte N-Menge und somit die N-Überschüsse ausdrückt ($R^2 = 0,84$ und $0,83$ in beiden Jahren). Positiv hervorzuheben bleibt der Bezug mit dem Kornertrag von $0,59$ und $0,70$ im Jahr 2015 bzw. 2016. Dabei zeigten sich auch innerhalb der N-Stufen ähnliche Bezüge, was die Eignung der Modelle für die Unterscheidung von Sorteneigenschaften unterstreicht. Trotz der Vielzahl an getesteten Indizes hebt sich vor allem die Gruppe der ‚Red-Edge‘-Indizes hervor (Tab. 2: REIP, RVSI, R780/740, CC760/730, LCI) die die mit höherer Biomasse und N-Status größer werdende Differenz zwischen Bestandesreflexion im roten und NIR-Bereich besser widerspiegeln. Der viel verwendete NDVI, der eine Wellenlänge weiter im NIR-Bereich (ca. 860 nm) nutzt, war hingegen nie unter den besten Indizes. Stattdessen zeigten einige Wasserbandenindizes gute Bezüge (WBI, NDWI), die sich über den Zusammenhang von Blattwasser und Biomasse sowie der schwächeren Absättigung der Banden in dichten Beständen erklären lassen (Peñuelas et al., 1993). Der Vergleich von Messterminen in enger Frequenz 2016 zeigte, dass vor allem Messungen in der frühen bis mittleren Kornfüllungsphase (Milchreife) geeignet sind (ca. 07.06. bis 28.06. 2016), was sich mit dem guten Messtermin am 25.06.2015 bestätigen ließ (Abb. 2). Hingegen konnten während des Ährenschiebens und der Blüte kaum Korrelationen mit dem Kornertrag gefunden werden, was durch phänologische Unterschiede durch die Ähren- und Antherenfarbe bedingt sein könnte. Auch während des Schossens zeigten sich aber Korrelationen, die keine genauen Vorhersagen, aber zumindest eine Einschränkung des züchterisch zu erfassenden Materials in der Anwendung ermöglichen könnten.

Die PLSR-Modelle erreichten meist ähnlich gute Bezüge wie die besten Vegetationsindizes (Tab. 2). Besonders für die Zielmerkmale Korn-NA und Kornertrag zeigten sich meist deutliche Verbesserungen im Vergleich zu den Vegetationsindizes. Dies deutet auf einen Vorteil der Kombination verschiedener Wellenlängen hin, da so auch Unterschiede in der Phänologie erfassbar sind, die die Merkmale bis zur Endreife beeinflussen.

Tab.2: Übersicht der Korrelations-Modelle für ausgewählte TM- und N-Merkmale. MW: Mittelwert; NSt: N-Stufe; NA: N-Aufnahme; Bl.: Blüte; TL: Translokation; VI: Vegetationsindex. Die Werte vor^a und nach^b dem Querstrich beziehen sich auf die Modelle für 2015 bzw. 2016. Der MW der Merkmale umfasst die in die Modelle eingeflossenen N-Stufen (2015: N2-N3, 2016: N1-N3). Beispielhaft für die TM-Merkmale sind die jeweils besten Vegetationsindizes aufgelistet. Siehe Index DataBase, 2017 für Details.

	BI.-TM (Gesamt)	BI.-TM (Stängel)	BI.-TM (Blatt)	TM-TL	Gesamt-TM	Kornertrag	
MW, alle NSt	9917 ^a 10919 ^b	6192 6935	1781 1932	3189 3177	15619 16570	8892 8525	
VI	0,69 0,57	0,58 0,38	0,84 0,87	0,20 0,27	0,70 0,57	0,59 0,70	
R², alle NSt	aktiver VI	0,67 0,34	0,46 0,18	0,75 0,77	0,19 0,17	0,5 0,64	0,47 0,58
	PLSR	0,71 0,54	0,52 0,38	0,85 0,93	n.s. 0,24	0,75 0,54	0,71 0,81
R², MW aus NSt (VI)	VI	0,59 0,49	0,57 0,43	0,63 0,7	0,32 0,43	0,67 0,49	0,72 0,66
RMSE, alle NSt	VI	318 1126	249 889	81 160	392 1040	516 1126	454 592
	PLSR	348 1185	271 898	79 116	473 1076	712 1185	493 551
bester VI	REIPIREIP	REIPIRVSI	LCII780/740	PRII RVSI	RVSIIREIP	WBIIWBI	
	BI.-NA (Gesamt)	BI.-NA (Stängel)	BI.-NA (Blatt)	N-TL	Gesamt-NA	Korn-NA	
MW, alle NSt	126 141	48 58	48 51	104 113	183 171	162 143	
R², alle NSt	VI	0,83 0,86	0,75 0,63	0,84 0,80	0,79 0,81	0,84 0,86	0,84 0,83
	aktiver VI	0,82 0,79	0,65 0,61	0,84 0,71	0,78 0,67	0,71 0,87	0,64 0,82
	PLSR	0,82 0,87	0,80 0,62	0,81 0,9	n.s. 0,24	0,91 0,89	0,88 0,96
R², MW aus NSt (VI)	VI	0,60 0,65	0,57 0,59	0,51 0,56	0,57 0,6	0,58 0,65	0,70 0,61
RMSE, alle NSt	VI	71 1	3 7	3 8	6 10	10 11	9 10
	PLSR	71 1	3 7	4 5	7 10	8 10	8 5

Dies scheint auch deshalb bedeutsam zu sein, da die Blütebiomasse nur schwache Beziehungen zum Kornertrag aufwies und für die spektrale Vorhersage des Kornertrags in der frühen Kornfüllungsphase nicht als Erklärung ausreicht. Der Einfluss des Blühzeitpunktes im Trockenjahr 2015 und der 2016 konnte dabei offenbar mit den PLSR-Modellen miterfasst werden.

Die drei aktiven Sensoren waren den jeweils besten Indizes des passiven Spektrometers meist deutlich unterlegen. Ausnahmen zeigten sich 2015 für einige Merkmale zur Blüte, was auf den dünneren Bestand in diesem Jahr

zurückzuführen sein könnte. Unter den aktiven Sensoren zeigte meist der ALS-Sensor die besten Bezüge.

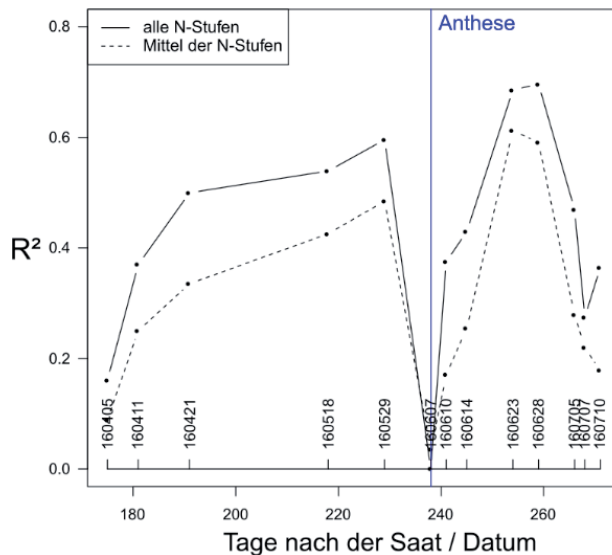


Abb. 2: Korrelationen des im Durchschnitt besten Wasserbandenindex (WBI) mit dem Kornertrag über drei N-Stufen hinweg sowie im Durchschnitt der N-Stufen nach Messzeitpunkten im Jahr 2016.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen die Eignung spektraler Methoden für die Abschätzung verschiedener TM- und N-bezogener Merkmale der NE von Winterweizensorten. Der Einsatz multivariater Verfahren erscheint vor allem für die Frühabschätzung komplexer Merkmale, die auch durch phänologische Unterschiede beeinflusst werden, sinnvoll, während sich für die direkte Erfassung der Pflanzenbestände Red Edge- und Wasserbandenindizes als meist ausreichend darstellen. Aktive Sensoren deuten Potentiale zur Verbesserung in der Messtechnik an, haben aber Kosten- und Anwendungsvorteile. Alternativ wird die Übertragung der Methoden auf Multispektralkameras für die drohnengestützte Hochdurchsatz-Phänotypisierung getestet.

5 Literaturangaben

- Ali, M.M., Al-Ani, A., Eamus, D., Tan, D.K.Y., 2017: Leaf Nitrogen Determination Using Non-Destructive Techniques – A Review. *Journal of Plant Nutrition*, 40(7), pp.928-95.
- Araus, J.L., Cairns, J.E., 2014: Field high-throughput phenotyping: The new crop breeding frontier. *Trends in Plant Science*, 19(1), pp.52-61.
- Erdle, K., Mistele, B., Schmidhalter, U., 2013: Field Crops Research Spectral high-throughput assessments of phenotypic differences in biomass and nitrogen partitioning during grain filling of wheat under high yielding Western European conditions. *Field Crops Research*, 141, pp.16-26.
- Garnett, T., Plett, D., Heuer, S., Okamoto, S., 2015: Genetic approaches to enhancing nitrogen-use efficiency (NUE) in cereals: challenges and future directions. *Functional Plant Biology*, v. 42(10), pp.921-941.
- Index Database, 2017. A database for remote sensing indices. <http://www.indexdatabase.de/>.
- Kipp, S., Mistele, B., Schmidhalter, U., 2014: The performance of active spectral reflectance sensors as influenced by measuring distance, device temperature and light intensity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, pp.24-33.
- Mistele, B., Schmidhalter, U., 2010: Tractor-Based Quadrilateral Spectral Reflectance Measurements to Detect Biomass and Total Aerial Nitrogen in Winter Wheat. *Agronomy Journal*, 102(2), pp.499-506.
- Moll, R.H., Kamprath, E.J., Jackson, W.A., 1982: Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen Utilization. *Agronomy Journal*, 74(3), pp.562-564.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., Save, R., 1993: The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14(10), pp.1887-1905.