

Sensorgestützte Ermittlung des Nährstoffbedarfs

U. Schmidhalter

Lehrstuhl für Pflanzenernährung, Technische Universität München

1. Einleitung

Das Pflanzenwachstum wird durch Minimumfaktoren am stärksten beeinflusst. Die mit Abstand größte Bedeutung in der Pflanzenproduktion kommt dem Stickstoff und Wasser zu, wenn auch in einzelnen Fällen die Phosphat- bzw. Mikronährstoffversorgung in Deutschland eine Rolle spielen. Der Schwefelbedarf wird in der Regel durch die Düngung standardmäßig abgedeckt. Sensorische Entwicklungen haben sich deshalb, auch weltweit, primär auf die sensorische Erfassung des Stickstoff- bzw. des Wasserstatus konzentriert. In Deutschland werden N-Sensoren in der Düngung seit ca. 15 Jahren eingesetzt.

Sensorik kann zur Optimierung der N-Versorgung und Erhöhung der N-Effizienz, zur Ertragsstabilisierung und in günstigen Fällen auch zu moderaten Ertragserhöhungen beitragen. Dies erfordert im Idealfall sowohl Informationen des Pflanzenzustandes als auch der Standortfaktoren, beispielsweise des Angebots an pflanzenverfügbarem Wasser, der Topographie und der Exposition. Sensorik, die Pflanzenzustände erfasst, widerspiegelt den aktuellen Zustand der Pflanze, sie ermöglicht nur einen zeitlich begrenzten Blick in die Zukunft. Kenntnisse der Bodenzustandsinformation können diesen Blick nach vorne erweitern und sollten in die Festlegung der Düngungshöhe bzw. des Düngungszeitpunktes einfließen. Pflanzen sind jedoch zugleich Indikatoren des Bodenzustandes, insofern können auch Verfügbarkeitszustände des pflanzenverfügbaren Wassers oder der Stickstoffmineralisierung durch die Pflanzen abgebildet werden. Dies erfordert die Überlagerung zeitversetzt erfasster Informationen.

In diesem Beitrag wird ein Überblick über weniger bekannte Teilaspekte der sensorgestützten Erfassung des Stickstoffbedarfs von Pflanzen gegeben und zugleich auf erforderliche Weiterentwicklungen hingewiesen. Zentral beleuchtet werden die Leistungsfähigkeit von Sensoriken zur Erfassung des N-Status und die damit gekoppelte Entwicklung von Düngungsalgorithmen. Für ausführlichere Betrachtungen grundlegender Aspekte sei auf entsprechende Übersichtsarbeiten verwiesen (Olf et al., 2005, Samborski et al., 2009).

2. Sensorik

2.1 N-Gehaltsmessung oder N-Aufnahmemessung?

Seit langem sind handgehaltene Sensoriken wie das SPAD-Meter und der N-Tester, die identische Informationen des relativen Chlorophyllgehalts liefern, im Einsatz. Der relative Chlorophyllgehalt korreliert gut mit dem N-Gehalt. Diese Sensoriken, von denen der N-Tester in der Praxis bekannter ist, liefern Punktinformationen des N-Gehalts und erfordern wiederholte Messungen, bei denen die Blattposition wie auch die Position an der Pflanze zu beachten sind. Ihre Stärke liegt in der guten Erfassung des N-Gehalts (Schmidhalter et al., 2008). Die positionsbezogene Betrachtung des jüngsten, voll entwickelten Blattes widerspiegelt die optimale N-Versorgung der Pflanze und ist insofern weniger aussagekräftig als die Betrachtung der Gesamtpflanze. Wenn auch spektral-sensorische Systeme nicht vollumfänglich den N-Status der Gesamtpflanze erfassen können, so reflektieren sie doch insgesamt besser das „Gesamtbild“ der Pflanze und können so zu einer sensitiveren Erfassung beitragen. Im Gegensatz zu auf Transmission beruhenden Messgeräten wie dem N-Tester, der den N-Gehalt der Pflanzen gut abbildet, liegt die Stärke reflexionsbasierter Sensoren in der Erfassung der N-Aufnahme bzw. der Biomasse. Für die Ableitung der Düngeempfehlung ist die Information der Biomasse der Pflanze bzw. der N-Aufnahme jedoch eher vorteilhaft.

2.2 Was sehen reflexionsbasierte Sensoriken?

Reflexionsbasierte Sensoriken erfassen den zurückgestrahlten Anteil des Lichtes im sichtbaren und nahinfraroten Bereich, der von der Pflanze reflektiert wird. Während in frühen Entwicklungsphasen die Gesamtpflanze erfasst wird, wird in späteren Zeitpunkten aufgrund der hohen Blattflächenindizes nicht mehr die Gesamtpflanze erfasst. Blätter machen den größten Flächenanteil von Pflanzen aus, insofern werden in erster Linie diese Pflanzenorgane erfasst. Nur sehr eingeschränkt werden Halme oder Stängel erfasst (Weigel et al., 2011, nicht veröffentlicht, Winterhalter et al., 2012). Da als Referenzmessungen häufig Gesamtpflanzeninformationen herangezogen werden, ist im direkten Vergleich mit der nicht-destruktiven, spektralen Information eine gewisse Vorsicht angebracht.

2.3 Wann und bei welchen Pflanzen kann man reflexionsbasierte Sensoriken einsetzen?

Da in frühen Entwicklungsphasen bspw. der Bestockungsphase von Getreide häufig eine Mischinformation aus Boden und Pflanze erfasst wird, hat sich der Einsatz der sensorbasierten Düngung zum zweiten Düngungszeitpunkt etabliert. Jüngste Untersuchungen zeigen eine prinzipielle Erfassbarkeit der N-Versorgung bereits in frühen Phasen (El-Sayed et al., 2014). Inwiefern diese Information in N-Empfehlungen umgesetzt werden kann, bedarf weiterer Abklärungen. Grundsätzlich ist die Erfassung von Reihenkulturen schwieriger, da die Pflanzen nur anteilig zur Spektralinformation beitragen. Da Kulturpflanzen wie Mais, zumindest in Europa, nur in frühen Entwicklungsphasen gedüngt werden, ist eine frühe sensorische Erfassung nur begrenzt aussagekräftig, und vorteilhafterweise nutzt man für die Düngung solcher Kulturen Standortinformationen (mapping- oder Kartenansatz). Schwierig gestaltet sich der Einsatz von Sensorik bei Kulturen wie Kartoffeln, da kein eindeutiger Bezug zwischen oberirdischem Aufwuchs/N-Status und der Menge und Qualität der produzierten Kartoffeln gebildet werden kann. Erfolgsversprechender scheinen neue Ansätze in der sensorischen Erfassung von Rapspflanzen zu sein, bei denen bereits die N-Aufnahme im Spätherbst bzw. Frühwinter als Indikation für die erste Düngung herangezogen wird.

2.4 Welche Sensoriken sind besser?

Während in den Anfangsjahren der Entwicklung der Präzisionslandwirtschaft in Deutschland vor allem so genannte passive Sensoriken zum Einsatz kamen, haben sich in den letzten Jahren zunehmend aktive Sensoriken etabliert. Im Gegensatz zu passiven Sensoriken, die die Sonne als Lichtquelle nutzen, setzt man bei aktiven Sensoriken künstliche Lichtquellen (LED, Xenonlampen, etc.) ein. Mittels aktiver Sensoriken kann auch bei fehlendem Licht bspw. in der Nacht oder bei niedrigen Sonnenständen gemessen werden. Aktive Sensoren sind unabhängig von den Einstrahlungsbedingungen, erfordern aber andererseits optimierte, einzuhaltende Abstände zum Pflanzenbestand (Kipp et al., 2014). Da die Energie des eingesetzten Lichtes quadratisch mit der Distanz abnimmt, bedeutet dies auch eine intensivere Erfassung sensornäherer Pflanzenteile. Bei kleinkörnigen Getreidepflanzen ergaben sich jedoch keine wesentlichen Unterschiede in der Erfassungsgüte der N-Versorgung zwischen aktiven und passiven Sensoren (Erdle et al., 2011). Im Gegensatz dazu konnte bei hochwachsenden Pflanzen wie Mais gezeigt werden, dass die Erfassungsgüte akti-

ver Sensoriken gegenüber passiven Sensoriken weniger gut ist (Winterhalter et al., 2012). Da in Europa im Gegensatz zu den USA fast nur in frühen Entwicklungsstadien gedüngt wird, spielt dieser Umstand nur eine eher untergeordnete Rolle. Grundsätzlich bleibt der Einsatz von Sensorik zur Düngung von Mais eingeschränkt. Messfelder sind bei aktiven Sensoriken aufgrund der erforderlichen näheren Positionierung und der senkrechten Anbringung kleiner als bei passiven Sensoren. Passive Sensoriken können problemlos in großer Distanz eingesetzt werden und auch eine schräge Beobachtungsgeometrie aufweisen und damit auch ein größeres Messfeld erfassen. Schräge Beobachtungswinkel sind in frühen Entwicklungsstadien aufgrund der geringen Bodenbedeckung vorteilhaft, während in späteren Stadien in dicht wachsenden Beständen aufgrund der Sättigung der Signale eine senkrechte Betrachtung vorteilhaft sein kann.

2.5 Optimierung spektraler Indizes zur Erfassung des N-Status

Während aktive Sensoriken in der Regel nur wenige spektrale Lichtquellen beinhalten, ermöglichen passive Sensoriken eine hyperspektrale Analyse. Mittels Hyperspektralanalyse können optimierte Indizes ermittelt werden und diese in aktive Sensoriken implementiert werden. Eine jüngere Untersuchung hat bei einigen aktiven Sensoriken Optimierungspotenziale bei der Auswahl der gewählten Spektralindizes aufgezeigt (Erdle et al., 2011).

In der letzten Dekade durchgeführte Arbeiten haben zur Ableitung optimierter Spektralindizes beigetragen (Mistele und Schmidhalter, 2010). In der Regel wird häufig das Verhältnis von zwei Wellenlängen, zum Teil auch normalisiert, als Index dargestellt, wobei auch aufwändigere Ableitungen der Spektralinformation, die die Chlorophyllabsorption flächig abbilden (Li et al., 2014a), zielführend sein können. Mit Contourplots, die die optimierte Beziehung aller möglichen dualen Spektralindizes darstellen konnten optimierte Indizes wie bspw. der NIR/NIR-Index gefunden werden. Weitere Verbesserungen können basierend auf Regressionsansätzen bzw. multivariaten Verfahren erreicht werden (Li et al., 2014b). Trotzdem kann festgehalten werden, dass weitgehend optimierte Spektralindizes für die Erfassung des N-Status verschiedener Pflanzen wie Weizen und Mais bekannt sind, während bei anderen wie Raps noch weitere Optimierungen erforderlich sind.

Da sich die Geometrie der Pflanzen im Verlauf der Entwicklung ändert, kann daraus abgeleitet werden, dass die Spektralsignatur eine relative Differenzierung

darstellt, und nicht eine absolute Erfassung bspw. der N-Aufnahme möglich ist. Optimierungen lassen sich hingegen erreichen, wenn optimierte Indizes für einzelne düngungsrelevante Stadien entwickelt werden.

Sorten unterscheiden sich in ihrer Spektralsignatur. Im einfachsten Fall behilft man sich mit einer relativen Kalibrierung auf dem Felde oder zieht Zusatzinformationen bspw. herrührend von N-Testerwerten der verschiedenen Sorten heran.

In der Regel sind Sensoren auf Trägerfahrzeugen wie z. B. Schleppern angebracht. Der N-Status kann hingegen auch mittels Drohnen, die über eine entsprechende Sensorik verfügen, gut erfasst werden (Kipp und Schmidhalter, 2014, nicht veröffentlicht). Da der zeitliche Einsatz von Drohnen zurzeit noch begrenzt ist, schränkt dies die mögliche Flächenerfassung ein. Die Leistungsfähigkeit satellitenbasierter Sensoriken wird laufend weiterentwickelt, so dass auch diese Systeme für die Optimierung der N-Düngung genutzt werden können. Nicht unwesentliche zeitliche Einsatzgrenzen ergeben sich jedoch bei Bewölkungsperioden, ebenso ist die Informationsverarbeitung und -bereitstellung zurzeit nur in Einzelfällen gewährleistet. Für die weitere Optimierung der N-Düngung werden satellitenbasierte Systeme auch in Zukunft eher nicht zum Einsatz kommen, hingegen weisen sie außerordentlich gute Potenziale in der Erfassung der Standortsheterogenität auf, die der Abgrenzung von Managementzonen dient.

Für die reine Informationsableitung des lokalen N-Status könnten sich zurzeit auch zur Verfügung stehende Billigsensoren wie der handgehaltene GreenSeeker, der vergleichbar genau ist wie die wesentlich teureren on-line eingesetzten Sensoren, als zweckdienlich erweisen, und in Kombination mit mapping-Information genutzt werden.

3. Managementzonen

Auf heterogenen Standorten variiert das Pflanzenwachstum. Während die sensorische Echtzeiterfassung kombiniert mit einem entsprechenden Algorithmus direkt entsprechend dem beobachteten unterschiedlichen Pflanzenwachstum die N-Düngung variiert, ist es in vielen Fällen auch vorteilhaft Schläge in Managementzonen einzuteilen und diese Information der Pflanzenerfassung

zu überlagern. Alternativ kann die Erfassung der Standortsheterogenität, die nicht auf dem aktuellen Pflanzenwachstum beruht, sondern bspw. auf Ertragskarten, Bodenkarten, topographischen Karten, standörtlichen Heterogenitätskarten bzw. langjährigen Beobachtungen des Bewirtschafters beruht, in eine standörtlich angepasste Düngeempfehlung umgesetzt werden.

In jedem Fall ist es sinnvoll und notwendig, sich Gedanken über die Ursachen der Heterogenität des Pflanzenwachstums zu machen. Zweifelsohne können dazu viele Faktoren beitragen, trotzdem sind einige als wichtiger zu betrachten. Langjährige Untersuchungen haben gezeigt, dass das Angebot an pflanzenverfügbarem Wasser eine wesentliche, wenn nicht die wichtigste Ursache unterschiedlichen Wachstums darstellt (Schmidhalter et al, 2006, Geesing et al., 2014). Diese Heterogenitätsursachen resultieren aus der Textur des Bodens und allenfalls der Topographie. Letztendlich stellen Ertragskarten ein Abbild dieser Faktoren und auch Ihrer Wechselwirkung mit der jeweiligen Witterung dar. Sofern diesbezügliche langjährige Informationen in verlässlicher Qualität zur Verfügung stehen, lassen sich diese Informationen gut einsetzen. Die Erfahrung zeigt, dass dies leider nicht oft zutrifft. In der letzten Dekade sind Methoden entwickelt worden, die leistungsfähig in der Lage sind standörtliche Ertragsunterschiede aufzuzeigen. Während in den Anfangsjahren der Einführung des Präzisionspflanzenbaus, bodenbasierte Methoden (bspw. geophysikalische Untersuchungsmethoden wie EM38) im Vordergrund standen (Schmidhalter, 2001), haben sich in der später zunehmend luftbasierte Erfassungen der Heterogenität als zielgerichtet erwiesen. Neben dem reinen Luftbild, eignen sich insbesondere spektrale bzw. thermale Erfassungen der Pflanzenbestände zur Ableitung von Managementzonen (Selige und Schmidhalter, 2001). Mit diesen Methoden kann sehr leistungsfähig die Heterogenität eines Standortes abgebildet werden. Zudem erlauben sie es auch ursächliche Informationen der Standortsheterogenität, bspw. aus Thermalbildern, abzuleiten. Für diesen Zweck eignet sich die Pflanze als sehr gut geeigneter Indikator der standörtlichen Heterogenität. Diese Information wird in Zukunft vermehrt aus Satellitenbasierter Informationen gewonnen werden.

Die Informationen, die gewonnen werden, sind je nach Stabilität der Ertragszonen unterschiedlich zu bewerten. Während sich im Rahmen langjähriger Untersuchungen in Bayern überwiegend stabile Hoch- und Niedrigertragszonen fanden, gibt es auch Beobachtungen auf Schlägen, die zeitlich variable Hoch- und Niedrigertragszonen aufweisen. Frühes gefördertes Wachstum beispielsweise

auf sandigen, südexponierten Teilschlägen kann sich im Verlauf der Vegetation aufgrund von Wassermangel gegenüber schwereren, tiefgründigeren Teilzonen abschwächen. Erforderlich ist somit der Miteinbezug von Standortsinformationen (nFK, Exposition, Topographie).

4. Ableitung von Düngealgorithmen

Die Algorithmierung, d. h. die Festlegung der Düngungsregeln, bleibt der entscheidende Optimierungsschritt. Neben der Steuerung des aktuellen Wachstumszustandes, ist die ursächliche Kenntnis der Faktoren, die zu unterschiedlichem Wachstum beitragen, entscheidend. Dominierend sind hier standörtliche Unterschiede in der Wasserversorgung. Kenntnisse der Interaktion zwischen Wasserversorgung und N-Angebot ermöglichen optimierte Festlegungen der N-Düngung (Geesing et al., 2014). Dies eröffnet sowohl die Möglichkeit eines einfachen kartenbasierten Ansatzes, der mit kostengünstiger Sensorik unterstützt werden kann, bzw. die on-line Ausbringung von Stickstoff oder die Kombination des on-line Ansatzes mit dem Kartenansatz. Ein retrospektiver Blick über die vegetative, düngungsrelevante Phase in die reproduktive Phase kann bei vielen Kulturen zu weiteren Optimierungen in der N-Düngung beitragen.

Mehrjährige Untersuchungen zeigen, dass auf Niedrigertragsstandorten die N-Düngung gegenüber der Düngung auf Hohertragsstandorten reduziert werden sollte (Ebertseder et al., 2005, Jungert und Schmidhalter, 2011, unveröffentlicht). Damit lassen sich bei vergleichbaren Erträgen nicht unwesentliche N-Einsparungen erreichen, die auch zu einem reduzierten N-Austrag beitragen und somit die Umweltemissionen erniedrigen. Auf Hohertragsstandorten ist zudem eine weitere Erhöhung der N-Düngung gegenüber der betriebsüblichen N-Menge nicht vorteilhaft. Auch auf kolluvial geprägten Hohertragsstandorten lässt sich Stickstoff gegenüber der betriebsüblichen Düngung einsparen. Mit Sensorik kann die N-Nachlieferung aus dem Boden gut erkannt werden und in die Festlegung der Düngungshöhe einbezogen werden. Mehrjährige Erfahrungen zeigen, dass gegenüber dem Betriebsdurchschnitt in der Regel nur leicht höhere Erträge erreicht werden können. Je nach Algorithmierung ermöglichen N-Sensoren eine Homogenisierung der Bestände, welche zu einer effizienteren Ernte beitragen können. Einsparungen im N-Einsatz sind in der Regel umso höher, je weiter der Betrieb vom Düngungsoptimum entfernt ist.

Zielführend wird es sein, wenn im Idealfall auch das Angebot an mineralischem Bodenstickstoff im Frühjahr sensorisch abgebildet werden könnte und die Erfassung der N-Versorgung in sehr frühen Stadien in die N-Düngung einbezogen werden kann.

5. Zusammenfassung

Mit Sensorik kann leistungsfähig der N-Status verschiedener Kulturpflanzen erfasst werden. Vorhandene Sensoren unterscheiden sich bei vergleichbaren Spektralindizes nicht wesentlich in der Erfassungsgüte. Optimierte Indizes sind für verschiedene Kulturpflanzen entwickelt worden. Nach wie vor besteht ein Bedarf in der Weiterentwicklung von Düngungsalgorithmen. In den letzten Jahren sind effiziente Verfahren zur Erfassung der Standortsheterogenität entwickelt worden, jedoch noch nicht in die Praxis übertragen worden. Durch Kombination von standörtlicher Information und des sensorisch erfassten N-Status lässt sich die N-Düngung weiter optimieren. Dies ermöglicht N-Einsparungen bei vergleichbaren Erträgen und trägt zu reduzierten Emissionen in die Umwelt bei. Die satellitenbasierte Erfassung der Standortsheterogenität wird zunehmend die schlepperbasierte Sensorik in der N-Düngung unterstützen. Für kleinere Betriebe eignen sich auch kartenbasierte Ansätze, die durch kostengünstige Sensorik zur Erfassung des N-Status unterstützt werden können.

6. Literaturangaben

- Ebertseder, T., Schmidhalter, U., Gutser, R., Hege, U., Jungert, S., 2005: Evaluation of mapping and one-line nitrogen fertilizer application strategies in multi-year and multi-location static field trials for increasing nitrogen use efficiency of cereals. In: Precision Agriculture '05, ed. J.V. Stafford, Wageningen Academic Publishers, 327-335.
- El-Sayed, S., Kipp, S., Schmidhalter, U., 2014: Comparison of passive reflectance sensing and digital image analysis for assessing the nitrogen status and biomass of wheat at early crop development stages. *Europ. J. Agron.* (submitted).
- Erdle, K., Mistele, B., Schmidhalter, U., 2011: Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Res.* 124, 74-84.

- Geesing, D., Diacono, M., Schmidhalter, U., 2014: Site-specific effects of variable water supply and nitrogen fertilisation on winter wheat. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 509-523.
- 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. Agr.* 100, 24-33.
- Li, F., Mistele, B., Hu, Y., Chen, X., Schmidhalter, U., 2014a: Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *Eur. J. Agron* 52, 198-209.
- Li, F., Mistele, B.; Hu, Y., Chen, X., Schmidhalter, U. 2014b Optimising three-band spectral indices to assess aerial N concentration and N uptake of winter wheat remotely in China and Germany. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 92 (2014) 112-123.
- Mistele, B., Schmidhalter U., 2010: Tractor-based quadrilateral spectral reflectance measurements to detect biomass and total aerial nitrogen in winter wheat. *Agron. J.* 102, 499-506.
- Olfs, H.W., Blankenau, K, Brentrup, F, Jasper, J, Link, A, Lammel, J., 2005: Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 414-431.
- Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009: Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101, 800-816.
- Schmidhalter, U., 2001: Geophysikalische Kartierung von Bodeneigenschaften für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. *Landtechnik*, H. 6, 417.
- Schmidhalter, U., Bredemeier, C., Geesing, D., Mistele, B., Selige, T., Jungert, S., 2006: Precision Agriculture: Spatial and Temporal Variability of Soil Water Nitrogen and Plant Crop Response. *Bibliotheca Fragmenta Agromonica* 11, 97-106.
- Schmidhalter, U., Maidl, F.-X., Heuwinkel, H., Demmel, M., Auernhammer, H., Noack, P., Rothmund, M., 2008: Precision Farming - Adaptation of land use management to small scale heterogeneity. In: P.Schröder, J.Pfadenhauer and J.C. Munch (Eds.). *Perspectives for Agroecosystem Management*, Elsevier, 121-199.
- Selige, T., Schmidhalter, U., 2001: Site specific soil resource mapping using remote sensing. 3rd. Europ. Conf. Precision Agric., Montpellier, 307-311.

Winterhalter, L., Mistele, B., Schmidhalter, U., 2012: Assessing the vertical footprint of reflectance measurements to characterize nitrogen uptake and biomass distribution in maize canopies. *Field Crops Res.* 129, 14-20.