

Digitale teilflächenspezifische Stickstoffdüngung – eine ökonomisch-ökologische Perspektive

Markus Gandorfer

Zusammenfassung

Ansätze zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung werden seit mehr als 20 Jahren erforscht und entwickelt und sind seit vielen Jahren praxisverfügbar. Dabei wird zwischen sogenannten Mapping-Ansätzen, die auf der Verwendung historischer Informationen beruhen, und Online-Ansätzen, bei denen der Bedarf während der Düngung über Sensoren ermittelt wird, sowie einer Kombination der beiden Ansätze unterschieden. Die Erwartungen an die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung sind hoch. Sie soll beispielsweise zur Steigerung der Stickstoffeffizienz führen und damit auch ökologische und ökonomische Vorteile bieten. Dennoch bleibt der tatsächliche Praxiseinsatz der Technologie insbesondere in kleinstrukturierten Agrarregionen hinter den Erwartungen zurück. Die Gründe dafür sind vielfältiger Natur. Studien bestätigen zwar die ökologischen Vorteile der Ansätze, aus ökonomischer Sicht sind die Effekte jedoch oftmals begrenzt. Dies liegt insbesondere am flachen Verlauf teilflächenspezifischer Stickstoff-Produktionsfunktionen im Bereich des ökonomischen Optimums. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht besteht damit die Herausforderung darin, die Flächen zu identifizieren, die ein hohes ökonomisches Potenzial für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung aufweisen. Zusätzlich ist festzustellen, dass die Anwenderfreundlichkeit oftmals Optimierungspotenzial aufweist, was beispielsweise durch verbesserte Düngealgorithmen erreicht werden könnte.

Summary

Site-specific nitrogen fertilization: an economic-ecological perspective

Having been researched and developed for over 20 years, site-specific nitrogen fertilization is now being applied in practice for many years. The approaches may be categorized as mapping approaches relying on historical data, online approaches using sensors to determine the required amounts during the fertilization process, and combinations of these. The expectations of site-specific nitrogen fertilization are high, as it should increase nitrogen efficiency and thereby provide ecological and economic advantages. However, the current level of implementation of the technology lags behind expectations, especially in small-scale agricultural regions. The reasons are manifold. While studies confirm the ecological advantages of site-specific fertilization, its economic effects often remain limited, mainly because a flat region around the economic optimum of the site-specific nitrogen production function. The challenge from an economic point of view is thus to identify fields with a high economic potential for site-specific fertilization. Additionally, fertilizing algorithms still need to be improved.

✉ Priv.-Doz. Dr. Markus Gandorfer, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Kleeberg 14, 94099 Ruhstorf a. d. Rott; markus.gandorfer@lfl.bayern.de

Einführung

Die digitale teilflächenspezifische Stickstoffdüngung ist im Kontext von Precision Farming (»Präzisionslandwirtschaft«) angesiedelt¹ und eigentlich keine neue Entwicklung. Das Thema wird seit mehr als 20 Jahren verfolgt, es hat in dieser Zeit verschiedene Höhen und Tiefen durchlebt. In der jüngsten Zeit hat es im Zuge der Diskussionen um Digitalisierung in der Landwirtschaft (»Landwirtschaft 4.0«) und aufgrund verschiedener neuer technologischer Entwicklungen wieder stärker an Bedeutung gewonnen. In diesem Beitrag steht der Stickstoff im Mittelpunkt, aber sehr viele Aspekte sind durchaus übertragbar auf andere Anwendungen, z. B. auf die teilflächenspezifische Aussaat oder Bodenbearbeitung. In den Pflanzenbausystemen ist Stickstoff »der Motor« mit seiner bedeutenden Ertrags- und auch Qualitätswirkung. Auf der anderen Seite verursacht Stickstoffdünger im System eine Reihe negativer externer Effekte: Die Düngemittelproduktion ist enorm energieintensiv und damit klimarelevant, weiterhin sind Lachgasemissionen sowie die Nitratproblematik anzuführen. Es gibt also gute Gründe, den Stickstoffeinsatz in der Landwirtschaft zu optimieren, und jedes eingesparte Kilogramm Stickstoff ist dabei wichtig. Die Digitalisierung kann dazu einen Beitrag leisten, ohne die Wirtschaftlichkeit zu gefährden.

Ansätze zur teilflächenspezifischen N-Düngung

Die Idee der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung entstand aus dem Bestreben, auf die Standortheterogenität gezielt zu reagieren. Im Falle des Stickstoffdüngers bedeutet dies, nicht mehr eine einheitliche Menge zu applizieren, sondern die Intensität gemäß der Standortheterogenität optimal zu variieren. Für die Umsetzung in der Praxis sind zwei Schritte notwendig. Erstens muss die Heterogenität des Standortes erfasst werden und zweitens müssen die Informationen zur Heterogenität mithilfe von Entscheidungsregeln bzw. Algorithmen hin zu einer variierenden Betriebsmittelapplikation umgesetzt werden.

Im Bereich der teilflächenspezifischen Düngung wird grundsätzlich zwischen drei Ansätzen unterschieden, wobei hinsichtlich der Bezeichnung der Ansätze Unterschiede bestehen können (siehe z. B. Auernhammer 2001):

- Bei Online-Ansätzen wird der Bedarf direkt während der Düngung über Sensoren ermittelt. Dies können Spektralsensoren sein, die auf dem Traktordach oder im Frontanbau angebracht sind. Die mit der Sensorik erfassten Informationen werden verarbeitet und die Düngemenge wird sofort entsprechend variiert.
- Demgegenüber beruhen die sogenannten Mapping-Ansätze auf der Verwendung historischer, d. h. im Vorfeld erhobener, Informationen. Beim Mähdrusch können z. B. georeferenzierte Ertragskarten erzeugt werden, die dann für weitere Anwendungen wie der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung zur Verfügung stehen. Meist werden die Karten einiger Jahre im Durchschnitt verwendet, um beständige Muster zu generieren, anhand derer die Betriebsmittelmenge ausgebracht wird.
- In kombinierten Ansätzen werden einerseits langjährige Informationen verwendet, andererseits wird die aktuelle Situation über die Online-Messung berücksichtigt.

In jüngster Zeit kommen immer öfter Satellitendaten zum Einsatz; eine klassische Biomasseertragskarte kann so inzwischen zu relativ geringen Kosten erworben werden. Im Vergleich dazu sind sogenannte Online-Sensoren mit einem relativ hohen Investitionsdarf (ca. 20 000 bis 40 000 €) verbunden. Klassischerweise gehören Biomassekarten auf Basis von Satellitendaten zu den Mapping-Ansätzen, da auch hier i. d. R. 4–5 Jahre an Informationen verwendet werden, um beständige Muster hinsichtlich der Biomasse darstellen zu können. Da die zeitliche Verfügbarkeit dieser Informationen ansteigt und auch die Serviceanbieter immer zeitnäher entsprechende Karten zur Verfügung stellen können, verringert sich die Zeitdistanz zwischen der »Messung« und der tatsächlichen Düngerapplikation zunehmend, sodass satellitengestützte Methoden mehr und mehr in Richtung der klassischen Online-Ansätze rücken.

1 Für eine Systematisierung der Begriffe Precision Farming, Smart Farming und Landwirtschaft 4.0 siehe Gandorfer et al. 2017.

Erwartete ökonomische und ökologische Effekte

Ökonomische und ökologische Potenziale bzw. Effekte der Teilschlagbewirtschaftung können klassischerweise mithilfe von Modellen auf Basis teilflächenspezifischer Produktionsfunktionen analysiert werden. So nutzen beispielsweise Meyer-Aurich et al. (2010) ein Modell auf Basis teilflächenspezifischer Stickstoffproduktionsfunktionen sowie Proteinfunktionen, um die ökonomischen Vorteile einer teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung sowie einer qualitätsdifferenzierten Ernte zu bewerten. In diesem Kontext zeigt die in Abbildung 1 dargestellte Produktionsfunktionsanalyse den Unterschied zwischen einer Hohertrags- und einer Niedrigertragszone im selben Schlag. Klassischerweise wird bei einer einheitlichen Bewirtschaftung in allen Ertragszonen die gleiche Menge an Stickstoff ausgebracht (rot gestrichelte Linie in Abb. 1), die je nach betrieblichem Intensitätsniveau unterschiedlich hoch sein kann. Bei einer ökonomisch optimierten teilflächenspezifischen Bewirtschaftung wird versucht, die applizierte Düngermenge an den ökonomischen Optima (optimale spezielle Intensität) zu orientieren. Die meisten Düngesysteme zielen aktuell jedoch nicht das ökonomische Optimum an, sondern versuchen, das Ertragspotenzial auszuschöpfen.

Durch die teilflächenspezifische Bewirtschaftung stellen sich positive Umwelteffekte besonders in den Niedrigertragszonen ein. Hier kommt es i. d. R. zu größeren Reduktionen in der Stickstoffintensität, da Landwirte diese erfahrungsgemäß an den Hohertragszonen orientieren. Dies ist besonders bemerkenswert, weil Niedrigertragszonen häufig auch ein höheres Auswaschungsrisiko zeigen. Auf den Hohertragszonen ist dagegen meist mit einer relativ geringen Intensitätsreduktion zu rechnen. Ökonomisch sind die Vorteile jedoch in beiden Fällen gering, da die Kurvenverläufe der stickstoffkostenfreien Leistung, d.h. der um die Stickstoffdüngerkosten bereinigte Erlös, im Bereich der Optima sehr flach sind (Abb. 1). Bei dem hier dargestellten Stickstoffsteigerungsversuch handelt es sich dabei nicht um einen Einzelfall. Tatsächlich sind die relativ großen Toleranzbereiche im Bereich des Optimums ein in der Literatur öfter diskutiertes Phänomen (Pannell 2006, Gandorfer & Meyer-Aurich 2017).

Peter Wagner verglich in längeren Versuchsreihen eine einheitliche mit einer sensorgestützten teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung (Weizen) anhand der Größen Ernteertrag, Stickstoffintensität und die um die Stickstoffkosten bereinigte Leistung (Tab. 1, Wagner 2012). Von 2005 bis 2010 hat die sensorgesteuerte Düngung nur in knapp der Hälfte der Jahre zu einem

Tab. 1. Ertrag (in dt/ha), Stickstoffintensität (in kg/ha) und stickstoffkostenfreie Leistung (in €/ha) bei einheitlicher und bei sensorgesteuerter Düngung auf verschiedenen Schlägen, 2005–2010. Winterweizen; Lehr- und Versuchsgut Görzig (Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg). – Nach Wagner 2011, zitiert in Wagner 2012.

Jahr, Schlag	Ertrag (dt/ha)		Stickstoffintensität (kg/ha)		N-kostenfreie Leistung (€/ha)	
	einheitlich	Sensor	einheitlich	Sensor	einheitlich	Sensor
2005, S1	71,9	74,5	175	182	544,66	563,95
2005, S2	76,3	77,1	180	117	581,48	627,16
2006, S3	61,1	57,5	180	164	533,75	505,86
2006, S4	58,3	56,7	170	187	510,44	482,14
2007, S5	56,8	57,1	180	157	1010,47	1032,81
2007, S6	46,0	46,0	180	144	794,04	819,60
2007, S7	53,3	52,0	169	164	948,14	925,64
2008, S8	96,9	94,6	175	147	1431,23	1420,62
2009, S9	99,6	102,3	165	175	844,56	860,38
2009, S10	84,5	82,6	170	170	678,10	657,96
2010, S11	94,8	91,6	195	161	1637,94	1602,94
Durchschnitt (gerundet)	73	72	176	161	865	864

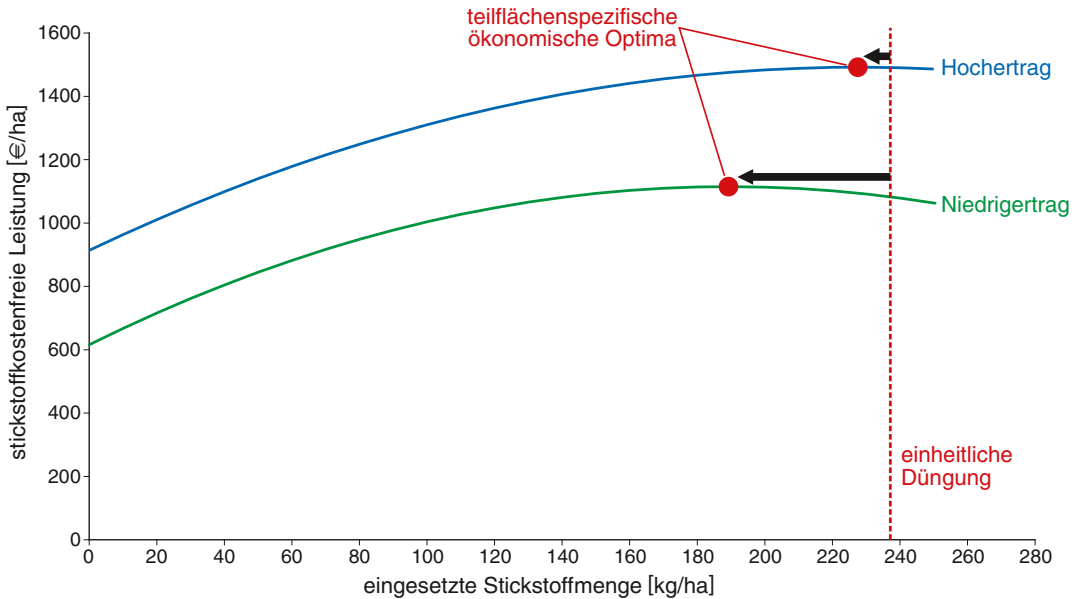


Abb. 1. Stickstoffkostenfreie Leistung (in €/ha) in Abhängigkeit der eingesetzten Stickstoffmenge (in kg/ha) in einer Hohertrags- und einer Niedrigertragszone eines Schlags. Darstellung auf Basis eines Stickstoffsteigerungsversuches, der in Bachmaier & Gandorfer (2009) beschrieben ist.

ökonomischen Vorteil geführt. Das bedeutet auch, dass ein Algorithmus, der an einem bestimmten Standort in einem bestimmten Jahr gut funktioniert, dies in einem anderen Jahr nicht unbedingt tun muss, und dass dann eine einheitliche Düngung u. U. ökonomisch vorteilhafter ist als die sensorgesteuerte. Im Durchschnitt über alle Jahre und Schläge ergibt sich zwar eine reduzierte Stickstoffintensität, aber ökonomisch, gemessen an der stickstofffreien Leistung, kaum ein Unterschied. Diese Ergebnisse, die aus Streifenversuchen gewonnen wurden, bestätigen damit die Erkenntnisse aus den theoretischen Potenzialbetrachtungen, wie sie in Abbildung 1 dargestellt sind.

Akzeptanz digitaler Technologien

Die beschriebenen Zusammenhänge und Ergebnisse haben natürlich Konsequenzen für die Verbreitung spezifischer digitaler Technologien in der Landwirtschaft. Wir haben 2018 begonnen, bei Feldtagen Landwirte diesbezüglich zu befragen. Aufgrund der noch unzureichenden Datenlage ($n = 75-99$, je nach Antwortkategorie) und da zu Feldtagen i. d. R. nur eine bestimmte Gruppe von Landwirten kommt, sind die ersten

Ergebnisse nicht repräsentativ. Dennoch wird schon jetzt deutlich, dass die teilflächenspezifische Düngung nur von einem relativ geringen Teil der Landwirte genutzt wird (aktuelle Befragung: ca. 10 %), während der überwiegende Teil der Befragten (ca. 55 %) eine Anschaffung auch in den kommenden fünf Jahren nicht plant. Roosen und Groß (2017) kommen in diesem Zusammenhang bei einer Befragung bayerischer Landwirte zu vergleichbaren Ergebnissen.

Die insgesamt hinter den Erwartungen zurückbleibende Verbreitung digitaler Technologien ist neben der fraglichen Wirtschaftlichkeit und dem hohen Investitionsbedarf auch durch andere Faktoren begründet (Schleicher & Gandorfer 2018). Gemäß einer Medienanalyse hemmen u. a. Inkompatibilitätsprobleme, d. h. Schnittstellenprobleme zwischen verschiedenen Komponenten, fehlende Entscheidungsalgorithmen, mit denen die erhobenen Daten zu einer konkreten Empfehlung weiterentwickelt werden, eine komplizierte Bedienung und fehlendes IT-Knowhow die Akzeptanz. Dazu kommen eher technische Probleme wie ein unzureichender Breitbandausbau oder die Störanfälligkeit sowie Bedenken hinsichtlich Datenschutz und Verlust der Datenhoheit, die erst in den letzten Jahren an

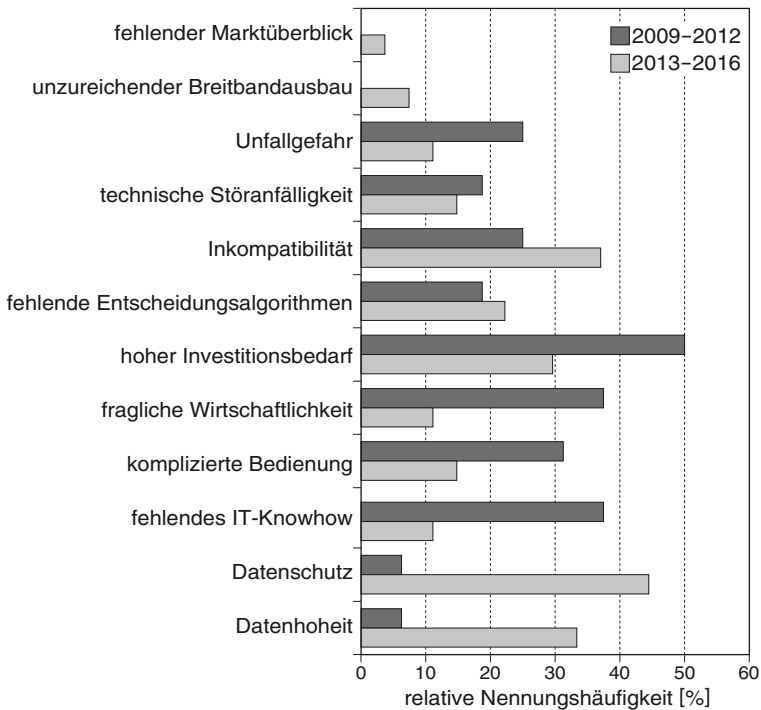


Abb. 2. Medienanalyse zu Akzeptanzhemmnissen für den Einsatz digitaler Technologien in der Landwirtschaft für die Zeiträume 2009–2012 und 2013–2016. Ausgewertet wurden die Fachzeitschriften »top agrar«, »dlz agrarmagazin« und »Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt«. – Nach Schleicher & Gandorfer 2018.

Bedeutung gewonnen haben (Abb. 2, Schleicher & Gandorfer 2018).

Ansatzpunkte zur Verbesserung der Akzeptanz

Zur Verbreitung von Technologien beizutragen, die einen positiven Umwelteffekt haben, ist ein wichtiges Ziel der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). In Bezug auf eine Steigerung der Akzeptanz der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung in der landwirtschaftlichen Praxis sind insbesondere die folgenden Ansatzpunkte zu nennen:

- Kostenreduzierung durch einen überbetrieblichen Einsatz kapitalintensiver Sensor-Technologien, durch Investitionsanreize wie BaySL Digital² und/oder durch die Realisierung

2 Bayerisches Sonderprogramm Landwirtschaft Digital (BaySL Digital; 01.10.18–31.12.20) zur Förderung von Investitionen im digitalen Bereich; <https://www.stmelf.bayern.de/agrarpolitik/foerderung/200529/index.php> [abgerufen 22.05.2019].

der digitalen teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung über kostengünstige »Satelliteninformationen« bzw. zukünftig evtl. über Smartphone-Apps.

- Entwicklung eines Indikators, der anzeigt, auf welchen Flächen der Einsatz der Technologie tatsächlich wirtschaftlich ist.
- Entwicklung ökonomisch optimierter und anwenderfreundlicher Düngealgorithmen.
- Aus- und Fortbildung: z. B. Kompetenzgutscheine im Rahmen der Bildungsoffensive Digitalisierung³.

In den folgenden Abschnitten werden einige der genannten Ansatzpunkte aufgegriffen und näher erläutert.

3 Masterplan Bayern Digital II, Umsetzung im Geschäftsbereich des Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; https://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/allgemein/publikationen/sub_heft_1_2_18.pdf (S. 35–38) [abgerufen 23.07.2019].

Erste Erfahrungen aus einem Pilotprojekt zum überbetrieblichen Einsatz eines Sensorsystems zur N-Düngung

In Rain am Lech haben sich fünf Landwirte für einen gemeinschaftlichen überbetrieblichen Einsatz von Sensor-Technologien zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung interessiert. Die Betriebe liegen in einem sog. »roten Gebiet«,⁴ d.h., es herrscht bereits eine hohe Nährstoffbelastung. Die Betriebsleiter wollten daher aktiv werden, auch um der Gesellschaft zu demonstrieren, dass sie an der Lösung des Nitratproblems interessiert sind. Wir untersuchen dort überwiegend organisatorische und technische Aspekte der gemeinschaftlichen Nutzung und versuchen, Veränderungen im Düngemanagement qualitativ zu erfassen (Vinzent et al. 2019).

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass es sich nach wie vor um eine komplexe Technik handelt, die nicht für jeden Betriebsleiter einfach umzusetzen ist. Damit die Systeme am Betrieb funktionssicher eingesetzt werden können, sind nach der Erfahrung des ersten Projektjahres intensive Unterstützung und Knowhow nötig. Das heißt, die Sensorsysteme sowie insbesondere die implementierten Düngesysteme müssen wesentlich anwenderfreundlicher werden. Andererseits zeigt sich, dass der überbetriebliche Einsatz bei guter Planung mit einem relativ geringen Mehraufwand zu realisieren ist. Auch ist ein gewisser »edukativer Effekt« zu beobachten, d.h., die Betriebsleiter setzen sich mit den Messwerten der Sensorik auseinander und reflektieren ihre Düngemittelintensität in der Vergangenheit. Dies ist ein sehr wichtiger Aspekt der Technologie, da damit das weit verbreitete Sicherheitsdenken – »besser 10 % mehr Stickstoff verwenden, um auf der sicheren Seite zu sein« – durch digitale Technik potenziell reduziert werden kann.

Auf welchen Flächen ist der Einsatz der Technik wirtschaftlich?

In der landwirtschaftlichen Praxis stellt sich die zentrale Frage, ab welcher Standortheterogenität eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung ökonomisch vorteilhaft einzusetzen ist. Zur Beurteilung der Standortheterogenität wird dabei häufig die Ertragsvariabilität, beispielsweise abgeleitet aus Ertrags- oder Biomassekarten, herangezogen. In der in Abbildung 1 dargestellten Profitfunktionsanalyse drückt sich damit die Standortheterogenität im Abstand von Hochertrags- und Niedrigertragskurve (stickstoffkostenfreie Leistung) aus. Wie das dargestellte Beispiel zeigt (Abb. 1), kann der Abstand zwar relativ groß sein, aber eine Anpassung der Intensität bringt kaum ökonomische Vorteile, da der Kurvenverlauf flach ist. Nötig ist also ein Indikator, der nicht den Abstand, sondern die Steigung der Funktionen wiedergibt. Nur, wenn sich die Steigungen der teilflächenspezifischen Profitfunktionen stark unterscheiden, besteht ein ökonomisches Potenzial durch mehr Präzision bei der Betriebsmittelapplikation.

Wir haben einen solchen Indikator mit hoher Korrelation zur Wirtschaftlichkeit entwickelt, der im Prinzip auf der Standardabweichung der teilflächenspezifischen Steigungen der Profitfunktionen beruht (Pannell et al. 2019). Dieser Indikator kann künftig praxistauglich durch Kopplung von Satelliteninformationen und Pflanzenwachstumsmodellen, wie es einige Unternehmen bereits realisieren, ermittelt werden.

Anwenderfreundliche und ökonomisch optimierte Düngelgorithmen

Anwenderfreundlichkeit: Bei den derzeitigen Anwendungen bzw. Düngelgorithmen (Stand 04/2019) sind die Landwirte mit ihren Entscheidungen oft auf sich selbst gestellt oder werden mit der Parametrisierung der Düngesysteme überfordert. Dazu zwei Beispiele: Über die App Solorrow zur teilflächenspezifischen Düngung (www.solorrow.com) kann der Landwirt auf Basis einer Biomassekarte seine teilflächenspezifische Düngung planen. In der Anwendung werden einzelne Ertragszonen generiert und die zugehörigen Flächenanteile berechnet, aber für die Bemessung der Düngemittelintensität bekommt der Landwirt keine Empfehlung, d.h., die Entscheidung, wie viel gedüngt werden soll, bleibt

4 Ausweisung gemäß Düngeverordnung (DüV: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen) vom 26. Mai 2017, § 13.

ihm selbst überlassen. Dem steht z. B. ein sehr aufwändiges »absolutes« Düngesystem gegenüber, das im Isaria-Sensor der Firma Fritzmeier (<http://fritzmeier-umwelttechnik.com/isaria/>) implementiert ist. Es schlägt zwar konkret eine Stickstoffapplikation in kg/ha vor, der Parametrisierungsaufwand des Systems ist aber hoch und komplex. So muss der Landwirt z. B. das im jeweiligen Jahr erwartete Ertragspotenzial schätzen (das immer durch ein gewisses Wunschdenken bestimmt ist) und soll einen Wert zur Stickstoffnachlieferung bis zum nächsten Düngetermin angeben. Insbesondere die Abschätzung der Stickstoffnachlieferung verursacht in der Praxis große Unsicherheit (Vinzent et al. 2019).

Ökonomische Optimierung: Die Düngoptimierung zielt in der Praxis nach einer naturalen Größe, nämlich dem Ertrag in Dezitonnen pro Hektar. Unter ökonomischen Gesichtspunkten und Umweltaspekten ist dies nicht zielführend. Dies ist aus Sicht des Autors ein gutes Beispiel dafür, dass die Agrarwissenschaften ihrem interdisziplinären Anspruch nicht immer genügen und in diesem Fall die Produktionsökonomie sowie der Pflanzenbau nicht ausreichend interagieren. Denn sobald der Stickstoff als Kostenfaktor in die Berechnung eingeht, wird die Intensität bei der ökonomischen Optimierung sinken. Ökonomisch gesehen wird der Landwirt aufgrund der flachen Profitfunktionen (siehe oben) zwar nur geringfügig profitieren, es ergeben sich jedoch durch die niedrigere Intensität positive Umwelteffekte. Dass eine Düngeberatung auf Basis ökonomisch optimierter Düngealgorithmen in der Praxis realisierbar ist, zeigen Beispiele aus anderen Ländern. So spielen auf der Düngeberatungsplattform CNRC (Corn Nitrogen Rate Calculator) aus den USA (<http://cnrc.agron.iastate.edu/>) sowohl der Stickstoff- als auch der Maispreis eine Rolle. Im Zuge der Digitalisierung in der Landwirtschaft sowie im Sinne des »Smart Farming« wäre es also dringend geboten, bei der Entwicklung von Entscheidungsalgorithmen ökonomische und ökologische Aspekte in den Vordergrund zu stellen und sich von der traditionellen Optimierung natürlicher Zielgrößen zu lösen.

Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es sich bei der digitalen teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung nach wie vor um eine komplexe und aufwändige, aber spannende und zukunftsweisende Technologie handelt. Ihre Wirtschaftlichkeit ist aufgrund flacher Profitfunktionen begrenzt, aber sie bietet ökologische Vorteile; entscheidend ist dabei aber immer das spezifische Düngesystem. Künftig wird es darum gehen, die hier dargestellten Ansatzpunkte zu einer größeren Verbreitung der digitalen Technologien in der Praxis konsequent zu verfolgen, zumal die Zusammenhänge oftmals auf weitere Precision-Farming-Anwendungen übertragbar sind.

Danksagung

Der Autor dankt dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Forschungsvorhabens D/17/1.

Literatur

- Auernhammer, H. 2001. Precision farming – the environmental challenge. – *Computers and Electronics in Agriculture*, 30(1–3): 31–43.
- Bachmaier, M. & M. Gandorfer. 2009. A Conceptual framework for judging the precision agriculture hypothesis with regard to site-specific nitrogen application. – *Precision Agriculture*, 10(2): 95–110.
- Gandorfer, M. & A. Meyer-Aurich. 2017. Economic potential of site-specific fertiliser application and harvest management. – In: Pedersen, S. & K. Lind (eds.): *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*. – *Progress in Precision Agriculture*. Springer International Publishing: 79–92.
- Gandorfer, M., S. Schleicher, S. Heuser, J. Pfeiffer & M. Demmel. 2017. Landwirtschaft 4.0 – Digitalisierung und ihre Herausforderungen. – In: LFL (Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft, Hrsg.): *Ackerbau – technische Lösungen für die Zukunft*. Landtechnische Jahrestagung 2017. Schriftenreihe LfL, 6/2017: 9–19.
- Meyer-Aurich, A., A. Weersink, M. Gandorfer & P. Wagner. 2010. Optimal site-specific fertilization and harvesting strategies with respect to crop yield and quality response to nitrogen. – *Agricultural Systems*, 103(7): 478–485.
- Pannell, D. J. 2006. Flat-earth economics: The far-reaching consequences of flat payoff functions in economic decision making. – *Review of Agricultural Economics*, 28(4): 553–566.

- Pannell, D., M. Gandorfer & A. Weersink. 2019. How flat is flat? Measuring payoff functions and the implications for site-specific crop management. – *Computers and Electronics in Agriculture*, 162: 459–465.
- Roosen, J. & S. Groß. 2017. Agrar- und Ernährungswirtschaft. – In: Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. (Hrsg.): *Neue Wertschöpfung durch Digitalisierung*. München: 175–209.
- Schleicher, S. & M. Gandorfer. 2018. Digitalisierung in der Landwirtschaft: Eine Analyse der Akzeptanzhemmnisse. – In: Ruckelshausen, A., A. Meyer-Aurich, K. Borchard, C. Hofacker, J.-P. Loys, R. Schwerdtfeger, H.-H. Sundermeier, H. Floto & B. Theuvsen (Hrsg.): *Digitale Marktplätze und Plattformen*. Referate der 38. GIL-Jahrestagung in Kiel, 26.–27.02.18. Gesellschaft für Informatik, *Lecture Notes in Informatics, Proceedings*, 278: 203–206.
- Vinzent, B., M. Maidl, S. Münster & M. Gandorfer. 2019. Überbetrieblicher Einsatz eines Sensorsystems zur teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. – In: Meyer-Aurich, M., M. Gandorfer, N. Barta, A. Gronauer, J. Kantelhardt & H. Floto (Hrsg.): *Digitalisierung für landwirtschaftliche Betriebe in kleinstrukturierten Regionen – ein Widerspruch in sich?* Referate der 39. GIL-Jahrestagung in Wien, 18.–19.02.19. Gesellschaft für Informatik, *Lecture Notes in Informatics, Proceedings*, 287: 263–268.
- Wagner, P. 2012. So rechnen sich N-Sensoren. – *DLZ Agrarmagazin*, März 2012: 36–39.

Diskussion

W. Weisser: Lässt sich die Umfrage zur Akzeptanz der digitalen Technologien z.B. nach Betriebsgröße oder nach dem Alter der Befragten aufschlüsseln?

M. Gandorfer: Nachdem unsere Datenlage bisher begrenzt ist, haben wir das nicht gemacht, aber es gibt vergleichbare Studien, die zu diesen Fragen durchaus Antworten geben können.¹ Aber auch bei unserer Befragung zeigen sich die klassischen Zusammenhänge, z.B. dass mit steigendem Alter der Betriebsleiter die Technik eher weniger eingesetzt wird. Dieser Effekt darf aber nicht überinterpretiert werden, weil die Betriebsgröße mehr Einfluss hat. Für kleinere Betriebe ist die Technologie meist einfach nicht wirtschaftlich.

G. Weber-Blaschke: Welcher Parameter wird bei den Online-Systemen von dem Sensor zur Berechnung der Stickstoffdüngung gemessen?

M. Gandorfer: Grundsätzlich werden zwei Größen angestrebt, einerseits die Biomasse, andererseits der Chlorophyllgehalt. Dazu werden verschiedene Indices verwendet, die spezifische Vor- und Nachteile besitzen. Allgemein gesprochen werden verschiedene Wellenlängen miteinander verrechnet und daraus verschiedene Indices abgeleitet. Ein bekannter Index ist z.B. der NDVI (Normalized Density Vegetation Index), der sowohl eine hohe Korrelation zur Biomasse als auch zum Chlorophyllgehalt zeigt, aber unter unseren Produktionsbedingungen einen sogenannten Sättigungseffekt aufweist. Wie dann vom spezifischen Index zu einer Düngeempfehlung weitergerechnet wird, bleibt oftmals das Geheimnis der verschiedenen Firmen.

I. Kögel-Knabner: Das heißt, nur die Pflanze wird vermessen und der Boden geht in die Berechnung nicht ein?

M. Gandorfer: Ja, das stimmt für die Kategorie der Online-Ansätze.

V. Mosbrugger: Die Effizienz einer Düngung hängt ja auch vom Zeitpunkt und vom Wetter, d.h. der Temperatur und der Feuchtigkeit, ab. Bei einer Optimierung dieser beiden Parameter müsste eine zusätzliche Effizienzsteigerung möglich sein. Wird das gemacht?

M. Gandorfer: Natürlich spielen diese Überlegungen generell beim Düngemanagement eine Rolle, aber dass beispielsweise Wetterprognosen in Düngemittelalgorithmen direkt implementiert werden, ist mir bisher nur aus Forschungsansätzen bekannt. In Padua arbeitet z.B. eine Gruppe daran. Ich denke, hier sind wir noch weit von einer Praxisrelevanz entfernt.

A. Fischer: Die Leistungskurven, die Sie gezeigt haben, waren alle extrem flach. Könnte man nicht argumentieren, wir halbieren einfach den Stickstoffeintrag und messen gar nicht erst? Damit würde der Landwirt nicht nur die Hälfte seines Stickstoffeinsatzes sparen und bräuchte auch die aufwändige Technik nicht, sondern hätte trotzdem gewonnen, weil er keinen geringeren Ertrag hat.

M. Gandorfer: Das ist ein Stück weit der Punkt, den wir gerade in den Betrieben lernen, mit denen wir das Pilotprojekt durchführen. Wenn wir in drei oder vier Jahren dort unsere Mitarbeit beenden, hat die Technik, so hoffe ich, ein Bewusstsein verbreitet, dass eine Intensitätsreduktion möglich ist, auch einheitlich, ohne ökonomisch große Einschnitte zu haben. Man könnte es natürlich auch so handhaben, wie Sie gesagt haben, wobei eine Halbierung der Intensität natürlich weit überzogen wäre, aber ich befürchte, dass das in der Praxis nicht ohne den Lernprozess über die Sensorik durchzusetzen ist.

A. Fischer: Aber warum ist das so? Der Landwirt müsste dann weniger für den Stickstoffdünger bezahlen.

¹ Paustian, M. & L. Theuvsen. 2017. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. – Precision Agriculture, 18 (5): 701–716.

M. Gandorfer: Die Profitkurven zeigen einen flachen Verlauf, das heißt, in einem weiten Bereich macht es ökonomisch keinen großen Unterschied, ob wenig oder viel gedüngt wird. Aber aus Praxissicht wird natürlich ein höherer Ernteertrag angestrebt, auch wenn dieser mit höheren Kosten für den Stickstoffdünger verbunden ist. Dazu kommt die Optik des Pflanzenbestandes als wesentliche Einflussgröße. Ein mit einer höheren Intensität geführter Bestand ist für den Landwirt – eben in diesen zusätzlich nutzenstiftenden Bereichen jenseits der Ökonomie – durchaus eine anzustrebende Situation. Ich gebe Ihnen dennoch Recht, aber es wird nicht so einfach funktionieren. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung wäre nach meiner Meinung bei der Düngeberatung eine ökonomische Größe für den Düngemiteleinsatz zu fokussieren. Das wird nicht die Welt retten, aber man könnte damit letztlich ohne großen Technikeinsatz die Intensität je nach Preis-Kosten-Verhältnis um einige Prozent reduzieren.

B. Hoppe: Inwieweit geht die Größe der Fläche in die Kostenberechnungen ein?

M. Gandorfer: Bei den von mir vorgestellten Überlegungen bewegen wir uns immer noch

auf Teilkostenebene, d.h. die Technikkosten sind darin noch nicht berücksichtigt. Natürlich ist es immer besser, die Kosten der Technik auf möglichst viel Fläche zu verteilen, um eine entsprechende Kostendegression durchzusetzen – daher auch unser Pilotprojekt, in dem die Technik überbetrieblich eingesetzt wird.

A. Kellermann: Sind in den stickstofffreien Leistungen die Betriebskosten z. B. für Gebäude usw. berücksichtigt?

M. Gandorfer: Nein, es handelt sich um eine reine Teilkostenbetrachtung.

A. Kellermann: Für den Landwirt ist es natürlich besser, einen höheren Ertrag zu haben, weil er dann die anderen Betriebskosten auf diese zusätzlich erzielten Dezitonnen umrechnen kann.

M. Gandorfer: Das ist sicher auch ein Aspekt, den man mitberücksichtigen könnte. Aber ich denke, der zentrale Punkt ist letztendlich ein qualitativer Aspekt. Das Ansehen eines Landwirts in seiner Peergroup definiert sich stark durch Qualität und durch Ertrag. Dieser Aspekt ist bei der Diskussion um eine Intensitätsreduzierung nicht zu vernachlässigen.