

Abschlussbericht der Hanse Agro Beratung und Entwicklung GmbH zum Verbundprojekt Fuzzy Farmer

Verbundpartner

Hanse Agro Beratung und Entwicklung GmbH

Kirchstraße 14 a

24214 Gettorf

Ansprechpartner

Dr. Dominik Gerwers

gerwers@hanse-agro.de

0172-3268363

28.04.2022

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Laufzeit 01.09.2018 – 31.10.2021

Zuwendungsempfänger: Hanse Agro Beratung und Entwicklung GmbH	Förderkennzeichen: FKZ 281B300316
Vorhabensbezeichnung: Optimierte Stickstoffdüngung durch mehrparametrische Datenfusion und präzise Applikation in Echtzeit (Fuzzy Farmer)	
Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft	
Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 01.09.2018 bis 31.10.2021	
Projektleitung Dr. Dominik Gerwers	
Autoren: Norbert Zirps, Dr. Dominik Gerwers Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegen bei den Autoren.	

Schlussbericht zu Nr. 8.2

I. Kurze Darstellung

I 1. Aufgabenstellung

Der Anbau von Kulturpflanzen wie beispielsweise Getreide, Raps, Zuckerrüben und Mais unterliegt maßgeblich den naturgegebenen Einflüssen und Schwankungen verschiedener Umweltfaktoren (Temperatur, Niederschlag, Sonnenstrahlung). Standardisierte, immer wieder exakt gleich ablaufende Prozesse lassen sich in der Pflanzenproduktion unter freiem Himmel nicht erstellen. Der Anbauer muss vor jeder Maßnahme bspw. der Düngung die Situation neu bewerten und planen. Dabei kommt es auf ein hohes Maß an Fachwissen aber auch auf die Erfahrung am und die Kenntnis des Standorts an. Die Stickstoffdüngung von Winterweizen erfolgt im Frühjahr meist in geteilten Gaben. Vor jedem Düngungszeitpunkt wird analysiert, wie die Pflanzen entwickelt sind, wie sich die Witterung verhält, welche Stickstoffmengen aufgrund von Nachlieferungs- und Mineralisierungsprozessen aus dem Boden zur Verfügung stehen und welches Ertragspotential realistisch erscheint. In jedem Jahr und zu jedem Zeitpunkt liefert diese Analyse unterschiedliche empfohlene Mengen. Stark schwankende, heterogene Bodenbedingungen auf einer Fläche machen es unabdingbar, sich mit jeder dieser Zonen auseinanderzusetzen, um die begrenzten Ressourcen an der jeweiligen Stelle in der optimalen Menge zu applizieren. An dieser Stelle können Informationen über die Bodenarten bzw. -bedingungen und auch die direkte Reaktion der Pflanzen am jeweiligen Standort automatisiert, teilflächen-spezifisch in die Bemessung der Düngungsmenge einfließen.

Über einen Algorithmus (fuzzy logic) wurden mehrere relevante Parameter für eine optimierte Stickstoffdüngung je Teilgabe als unscharfe Information automatisiert verknüpft. Der Algorithmus gibt eine optimierte Lösung für einen bestimmten Schlag, Zeitpunkt sowie bestimmte Standortbedingungen aus. Die grundlegenden Entscheidungen, wie viel Stickstoff muss auf

Bereichen mit gut, mittel und schlecht entwickelten Pflanzen bzw. auf Bodenzonen mit guter, mittlerer, schlechter Ertragsfähigkeit gedüngt werden, stammen von den Landwirten. Die georeferenzierte Auflösung auf der Fläche, also wo sind die Pflanzen wie entwickelt bzw. wo ist welcher Bodentyp, wird von verschiedenen Messungen, teilweise in Echtzeit, bereitgestellt. Das heißt, es wurde ein Mensch-Maschine-System entwickelt, das unabhängige Lösungen von Teilgabe zu Teilgabe individuell bereitstellt.

Komplettiert wurde der Ansatz durch die Entwicklung eines Applikationssystems, das in Echtzeit mit Hilfe des generierten Algorithmus Sensor- und Karteninformationen für eine präzise und kleinräumige Düngerverteilung nutzt. Dabei sollte sowohl beim Biomassensensor und der Kartennutzung als auch bei der Applikation zwischen zwei Teilbreiten der Arbeitsbreite unterschieden werden können. Ein Gesamtmodell des Applikationsgerätes optimiert dabei die Düngerapplikation sowohl in Querrichtung mit unterschiedlichen Dosiermengen als auch zeitlich dynamisch in Längsrichtung.

Es wurden folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele formuliert:

- Optimierung der Stickstoffdüngung von Kulturpflanzen durch Datenfusion mehrerer relevanter Parameter aus Offline- und Echtzeitquellen,
- Minimierung des Aufwandes der Düngplanung durch die Entwicklung einer auf Fuzzylogik basierenden Entscheidungslogik,
- Verbesserung der Dosierung und Verteilung von Mineraldünger in der Teilfläche durch die Entwicklung von Modellen des Sensor-Streuer-Systems,
- Minimierung negativer klimaschädlicher Effekte bedingt durch eine höhere Effizienz der Nährstoffaufnahme von Kulturpflanzen, welche ein generelles verbessertes technisches System erreicht wird.

Grundsätzliche Aufgabe der Hanse Agro zur Erreichung dieser Ziele war die pflanzenbauliche Einschätzung und Validierung des Gesamtprozesses. Sowohl bei der Aufstellung der zu verwenden Parameter einschließlich deren Gewichtung im Applikationsalgorithmus als auch Anwendung der Entscheidungsmatrix sowie die Bewertung der resultierenden Düngerapplikationen sind die pflanzenbaulichen Kernkompetenzen der Hanse Agro gefordert gewesen. Diese Hauptaufgaben sind sowohl vor Ort auf dem Ihinger Hof bei den Versuchen der Universität Hohenheim als auch im Rahmen eigener on-farm research Versuche auf Beratungsbetrieben der Hanse Agro wahrgenommen worden (vgl. I 4.).

I 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das zu entwickelnde Entscheidungs- und Applikationssystem stellte ein innovatives Produktionsverfahren im Bereich Pflanzenschutz und Düngung dar, das in seinen Techniken weit über den Wissensstand zu Projektbeginn hinausgeht. Zwar wird bisher über die Nutzung von

modernen Techniken - insbesondere der Sensortechnik - ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Ertragsstabilität als auch insgesamt zur Optimierung des Anbaumanagements geleistet, allerdings ist dieser Beitrag als einfaktoruell zu bezeichnen. Es wird die Information des Bestandes zum Zeitpunkt der Überfahrt im sogenannten online Verfahren genutzt. Eine Bewertung der Teilfläche durch den Pflanzenbauexperten erfolgt jedoch nicht im Detail und eine Verbindung mit anderen teilflächenspezifischen Informationen findet nicht statt. Es stellt sich die Frage, wie der online Ansatz des Sensors, die verfügbaren offline Informationen und das pflanzenbauliche Fachwissen des Experten zu einer optimalen Teilgabe der Stickstoffdüngung verschmolzen werden soll.

Die Planung durch den Landwirt erfolgt bis dato eindimensional schlageinheitlich und wird mit der Sensorinformation in die Teilfläche übersetzt. Es wurden im Vorhaben Entscheidungshilfen benötigt, die zu einer Verbindung der verschiedenen teilweise auch unscharfen Informationen führen und somit wirksame Minderungs- und Anpassungsoptionen ableiten können.

Die Herstellung von synthetischen Düngemitteln insbesondere des Stickstoffdüngers ist sehr energieaufwendig, was mit einem hohen Ressourcenverbrauch und der Emission von Treibhausgasen verbunden ist. Auch die Qualität der Luft kann durch Ammoniakemissionen beeinträchtigt werden, wie bei der Ausbringung von Harnstoffdüngern, sowie durch Lachgasemissionen, die aus gedüngten Böden freigesetzt werden. Der hohe Energieverbrauch führt in absehbarer Zeit zu einer anderen wirtschaftlichen Bewertung des Einsatzes von synthetischen Düngemitteln. Je nach Marktlage wird so die Bewertung von Produktionssystemen anders als bisher stattfinden oder sogar neu erfolgen müssen.

Die Erhöhung der Effizienz der Nährstoffaufnahme von Kulturpflanzen durch ein besseres Management kann also einerseits die Emissionen von Treibhausgasen reduzieren, andererseits aber auch immer deutlicher zu einem wirtschaftlichen Vorteil avancieren und ist demnach immer zu fokussieren. Durch die Aufzeichnung und Auswertung der durchgeführten Düngungsmaßnahmen kann darüber hinaus zum Wissensgewinn des Landwirts beigetragen werden. Dadurch wird das Bewusstsein und die Bereitschaft des Landwirts für das „Change-Management“ in Klimaschutz und -anpassung gesteigert.

I 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben gliederte sich in 5 Meilensteine. Bereits im Bereich des ersten Meilensteins wurden durch die Hanse Agro wesentliche Kernpunkte für Bedarfs- und Anforderungsdefinition sowie für die Charakterisierung des Gesamtsystems geliefert. Im Meilenstein zwei wurde durch die Beschreibung und Erörterung der pflanzenbaulichen Zusammenhänge mit an dem Entscheidungs- und Fusionsalgorithmus gearbeitet. Nachdem im Meilenstein vier die Soft- und Hardware entwickelt worden ist, konnte die Hanse Agro im Meilenstein fünf zu der Analyse und Validierung des Gesamtkonzeptes beitragen.

Für die Erreichung dieser Meilensteine wurde das Vorhaben in 5 Arbeitspakete (AP) unterteilt. Im Bereich des AP 1 sind alle Projektpartner bei der Definition der Systemgrenzen genannt. Für diese Grenzen war die grundlegende Erarbeitung der Theorie der Fuzzylogik notwendig. Denkbar Entwicklungswege von Getreidebeständen sind konkret beschrieben, sowie in Form von Visualisierungen allen Projektpartnern erörtert worden. Die für die Einschätzung der Bodenverhältnisse zu verwendende Messtechnik war wesentlicher Kern der Anfangsdiskussion. Aus Erfahrungen der Hanse Agro mit dem EM 38 (Bodenleitfähigkeitsmessung) wurden wesentlich Kritikpunkte in der Diskussion dieser Messwerte im Projektkonsortium diskutiert. Die von BERNTSEN et.al. (2006) abgeleiteten Zusammenhänge zwischen EM 38 Messwerten bzw. SN Werten (online Messwerte des YARA N-Sensors® zur Bestimmung der Stickstoffaufnahme in den Pflanzen) mit dem Ertrag wurden ebenso wie die Ableitung der Wachstumsbedingungen von Pflanzen aus ECa Werten nach KITCHEN et.al (2003) und TREMBLEY et.al. (2010) erörtert.

Im AP 2.1 sollten durch die Hanse Agro pflanzenbauliche Zusammenhänge sowie die Parameterverknüpfung in Zusammenarbeit mit der Universität Hohenheim erarbeitet werden. Auch das AP2.2., in dem verschiedene Entwürfe für möglicher Entscheidungs- und Fusionsalgorithmen erstellt und diskutiert wurden, gehörte mit zu den Arbeitsschwerpunkten. Nachdem im Antrag das AP 4.1 mit den Simulationsstudien zum Entscheidungsalgorithmus, Regelalgorithmus und deren Verknüpfung keine Aufgabe für die Hanse Agro gesehen wurde, konnte jedoch durch Hinweise in den APs 2.1 und 2.2 auf eine Simulation des Yara N-Sensors® sowie auf eine Festlegung von Wichtungsfaktoren für die EM 38 Daten eine Mitarbeit an den diesen Studien erwirkt werden.

In Wechselwirkung zum AP 5.1. wurde aus den Daten der ersten Feldversuche aus dem Frühjahr 2019 auf dem Ihinger Hof eigene Auswertungen erstellt, welche gerade die Parameterverknüpfung prüfen und verfeinern sollten. Kollegen der Hanse Agro sind dazu regelmäßig zur Bonitur von Ort gewesen und haben die Analyse zur Entwicklung der Weizenpflanzen durchgeführt und entsprechende Empfehlungen zum Zeitpunkt und zur Menge der Stickstoffdüngung für die unterschiedlichen Zonen gegeben. Im Jahr 2020 und 2021 wurden auf Beratungsbetrieben der Hanse Agro ergänzende eigene on-farm Research Versuche durchgeführt. In diesen, mit der am Betrieb vorhandenen Technik, wurde in Großparzellen geprüft, inwieweit erste Parameterverknüpfungen mit einer üblichen Düngungsstrategie vergleichbar sind oder ob sich diese statistisch abgesichert unterscheiden.

Dieser wesentliche Schwerpunkt der Feldversuche (AP 5.1) ermöglichte eine erste pflanzenbauliche Analyse und Bewertung Gesamtsystems (AP 5.5). So konnten in diesen Versuchen auch erste Rückschlüsse auf die Entscheidungen der Parameterverknüpfung gezogen werden, welche bei weiteren Versuchen mit dem entstandenen Userinterface von großer Bedeutung sind.

I 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Stand des Wissens heute ist, dass (a) eine angepasste N-Dosierung die Biomasseproduktion erhöht und damit die organische Bodensubstanz steigert bzw. stabilisiert, dass (b) die gute fachliche Praxis eine große Bedeutung hat für die Nacherntegehalte an Nitraten im Boden und damit auch auf die Stickoxidemissionen (N_2O), dass (c) die reduzierte Bodenbearbeitung Eingriffe in den Boden minimiert und damit organische Bodensubstanz erhält oder sogar steigert (SNYDER et.al. 2009). Darüber hinaus ist allgemein bekannt, dass die Herstellung insbesondere des Stickstoffdüngers mit hohen CO_2 -Emissionen verbunden ist und schon deshalb jede Aufwandreduktion zu geringeren Treibhausgasemissionen führt (GIFFORD R.M. 1984). Weiterhin ist allgemein heute akzeptiert, dass nach wie vor erhebliche Reduktions- oder Effizienzpotenziale bei der Stickstoffdüngung bestehen, da in der heutigen intensiven landwirtschaftlichen Praxis im Mittel lediglich 50% der ausgebrachten Stickstoffnährstoffe von den Kulturpflanzen aufgenommen werden (SMIL V. 1999).

Die beiden Hauptparameter zur Erreichung einer hohen Arbeitsqualität einhergehend mit einer ökonomisch optimalen Düngung unter den strengen gesetzlichen Rahmenbedingungen der Düngeverordnungen sind die Dosiermengen und die Düngeverteilung (KAGE et.al. 2016, SCHAUER et.al. 2003, FULTON et.al. 2005). Während die Dosiermenge eher von pflanzenbaulichen Einflussgrößen bestimmt wird, ist die Verteilung des Düngers zum großen Teil von technischen Parametern beschrieben und begrenzt und wird schließlich von der zur Applikation vorherrschenden Witterung beeinflusst (Luftfeuchtigkeit und vor allem Wind). Neben den denkbaren pflanzenbaulichen Größen wie Bodenqualität und -nährstoffgehalt, Standortbedingungen, Sortenansprüchen, Wetterhistorie und -prognose sollten im Vorhaben die Erfahrungen und das Expertenwissen des Landwirts eine zentrale Rolle spielen. Nicht alle Parameter werden dabei exakt gemessen, oft werden Proben gemittelt oder Parameter geschätzt, was die Plausibilität und auch Reproduzierbarkeit unmittelbar beeinflusst. Diese gängige Praxis wird meist bei schlageinheitlichen Düngemaßnahmen umgesetzt, wobei immer mehr eine teilflächenspezifische Ansprache der Bestände mit Hilfe von terrestrischen Sensoren oder mittlerweile sogar mit Satellitendaten genutzt wird. Auch diese Messung der von den verschiedenen Anbietern oft als „Biomasse“ bezeichneten Messdaten muss von dem Anwender interpretiert und teilweise auch korrigiert werden. Diese dynamischen Faktoren sind produktionstechnisch schwerer einzuschätzen als zeitlich eher konstante Faktoren wie Bodenqualität oder Topografie, die je nach Qualität und Aussagefähigkeit der verfügbaren Daten zumindest theoretisch über Jahre genutzt werden können. Die Art der Verknüpfung verschiedener Parameter ist bis dato nur über eine Überlagerung von Sensorkarten mit Potentialkarten diskutiert worden. Ein echtes Multiparametersystem mit numerischer Verknüpfung lag und liegt hierbei in der praktischen Anwendung jedoch nicht vor (RECKLEBEN et.al. 2007). Vielmehr stellt sich die Frage wie

in sich komplexe, aber zeitlich konstante Faktoren wie z.B. die Bodengüte in der Teilfläche korrekt bestimmt oder sogar gemessen werden können, um in Form von numerisch, georeferenzierten Karten in Düngerapplikationen Anwendung zu finden.

Vorhandene Simulationen des Gesamtsystems Pflanze-Boden-Witterung (HumeWheat, RATJEN 2012) bieten durchaus interessante Ansätze, finden aber im praktischen Pflanzenbau derzeit kaum Bedeutung. Die hohe Komplexität und Dynamik der Bedingungen im Freiland ist wahrscheinlich in einer Simulation der Düngung kaum zielsicher abzubilden, was aber bei der angedachten Parameterverknüpfung und -auswahl auch im Vorhaben eine wesentliche Herausforderung und durchaus ambitionierte Aufgabe gewesen ist.

Es wurden folgende weitere bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, für die Durchführung des Vorhabens benutzt:

- von der Yara GmbH & Co. KG zur Verfügung gestellte Sensortechnik (inkl. Software)
- Hanse Agro:
 - Boniturmethoden und Protokolle
 - bisherige Erfahrungen Großflächenversuche mit Praxistechnik
 - bisherige Erfahrung in der Auswertung und Validierung von PF-Daten
- auf den Betrieben vorhandene Applikationstechnik, mit der von den Herstellern vorgegebenen Einstellung und der zur Verfügung gestellten Soft- und Hardware für die teilflächenspezifische Düngemittelapplikation
- Ertragskartierungen der Mähdrescher einschließlich der zugehörigen Software
- spezielle Software zur Geodatenverarbeitung: QGIS, GRASS GIS, R
- gemischte Modelle zur statistischen Auswertung der Versuche

I 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der gesamten Projektphase fand ein intensiver Austausch mit der Universität Hohenheim statt. Sowohl in der wissenschaftlichen Ebene als auch in der praktischen Ebene im Rahmen der Versuche auf dem Ihinger Hof.

Unmittelbar nach dem ersten Treffen im November 2018 wurde im Rahmen des AP 1.2 ein direktes Treffen mit der Universität Hohenheim initiiert. Nachdem in diesen die pflanzenbaulichen Rahmen erörtert wurde, wurde zunächst der erste Versuch in Frühjahr 2019 auf dem Ihinger Hof beratend betreut (AP 5.1) und im Anschluss ausgewertet um anschließend weiter über den Entscheidungsalgorithmus zu diskutieren (AP 2.2). Diese Erörterung im Herbst 2019 mit der Universität Hohenheim erzielte im Ergebnis die wesentlichen Eckpunkte und den Charakter der mehrparametrischen Datenfusion.

Zur Firma Disy Informationssysteme GmbH wurde im Herbst 2019 ein erster direkter Kontakt aufgebaut, um Möglichkeiten und Potenziale eines direkten Austausches oder sogar einer Kooperation zu erörtern. Die Hanse Agro konnte durch die Ergebnisse des AGRO-DE Projektes (ZIRPS, GERWERS 2020) konkrete Konzepte mit Anforderungen beschreiben, aber auf der anderen Seite auch pflanzenbauliche Fragen beantworten und Zusammenhänge darstellen. Disy ist es möglich gewesen, mit Fachkenntnissen und möglichen Lösungswegen Entwicklungstendenzen zu zeichnen. So ist beiden Partnern eine erste Orientierung außerhalb ihrer eigenen fachlichen Disziplin möglich gewesen, was für den weiteren Projektverlauf als essenziell festzuhalten ist.

Im Frühjahr 2020 wurde neben der erneuten Beratung auf dem Ihinger Hof ein eigener On-Farm Research Versuch auf der Domäne Bahrdorf im niedersächsischen Landkreis Helmstedt durchgeführt und anschließend ausgewertet, um auf dem Projekttreffen im Dezember gleichen Jahres dem Konsortium vorgestellt zu werden. Zur Realisierung dieser Versuche ist ein direkter Austausch samt gegenseitiger Zuarbeiten mit der Universität Hohenheim umgesetzt worden. Die Firma YARA stand als Partner bei der Einstellung und Interpretation der Sensortechnik im permanenten Austausch mit der Hanse Agro.

Diese Versuche wurden 2021 erneut durchgeführt, wobei der on-Farm research Versuch der Hanse Agro auf Gut Grünholz in Schleswig-Holstein durchgeführt wurde.

Im November 2021 wurde mit Disy eine Konsolidierung durchgeführt, um erneut die Schnittmengen zu eruieren. Gerade das von Disy im Frühjahr entwickelte Web-Userinterface konnte durch die Hanse Agro in seiner Bedeutung deutlich untermauert werden und schließt sich nahtlos an die im Jahr 2019 gesammelten Ideen und gestellten Anforderungen an. Erste wesentliche Anforderungen konnten durch dieses Userinterface als erfüllt festgehalten werden, was umso mehr das Bedauern der Hanse Agro schürt, dass das Projekt leider nicht verlängert worden ist.

II. Eingehende Darstellung

II. 1 Über die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele sowie

II. 2 über die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Den größten Anteil der Personal-, Sach- und Reisekosten wurde für die Tätigkeiten im AP 1.2, AP 2.1, AP 2.2 und AP 4.1 aber vor allem in den Praxistests und On-Farm-Versuchen der AP 5.1 sowie der Analyse in AP 5.5 aufgewendet. Auf die Tätigkeiten im AP 2.1, die die pflanzenbaulich wissenschaftliche Grundlage für das AP 5.1 bieten, wird im Folgenden zuerst explizit eingegangen.

Der hohe Energieverbrauch führt nach derzeitiger Marktlage (03/22) zu einem immensen Kostendruck des Produktionsfaktors Stickstoff. Dieser Druck führt sogar so weit, dass ganze Produktionsverfahren neu bzw. anders bewertet werden müssen. Mit dem Ziel, die Düngung von Kulturpflanzen zu optimieren, kann das Vorhaben seine Bedeutung für die Pflanzenproduktion mehr als deutlich unterstreichen. Für die Hanse Agro bedeutete dies, eine Matrix aufzustellen, welche möglichst viele denkbare Entwicklungswege eines Getreidebestandes darstellt. Ziel sollte sein, das pflanzenbauliche Expertenwissen in einer nachvollziehbaren Regelbasis darzustellen:

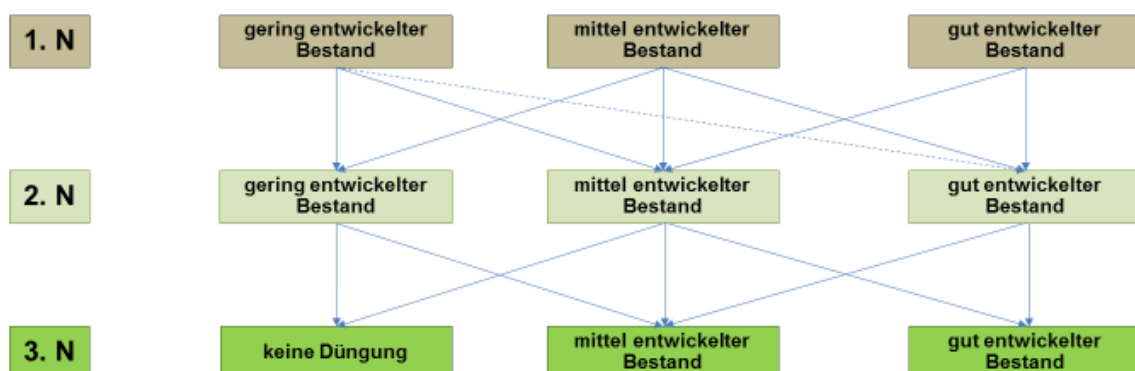


Abbildung: schematische Darstellung einer möglichen Entwicklung von Getreidebeständen zur unterschiedlichen Zeitpunkten im Frühjahr

Diese Darstellung der pflanzenbaulichen Rahmenbedingungen diente während der gesamten Projektphase als Diskussionsgrundlage und konnten gerade in interdisziplinären Diskussionen das Verständnis wesentlicher Entscheidungskriterien stützen. Werden die dargestellten Bestände näher definiert, sind je nach Situation, die im Vorhaben zu verwendenden Messsysteme nicht definiert oder deren Aussage für die Düngungsentscheidung nicht relevant. Zum Beispiel liefert der im Projekt verwendete YARA N-Sensor erst ab einer Bodenbedeckung von 70 bis 80% valide Messergebnisse. Deswegen ist dessen Anwendung zur ersten Stickstoffgabe nach Kenntnisstand der Hanse Agro nicht sinnvoll. Eine Information zur Güte beziehungsweise zur

Ertragsfähigkeit des Bodens sollte durch das EM38 in das Entscheidungssystem einfließen. In der Bestandesentwicklung ist die Bodengüte zwar wesentlich, kann aber in einzelnen Entscheidungssituationen der Düngung nicht unbedingt rechnerisch in die Ermittlung der zu düngenden Menge eingebunden werden. Diese Ansichten sorgten gerade im AP 2 zu deutlich erhöhtem Diskussionsbedarf, konnten allerdings bei der Definition des Entscheidungsalgorithmus durch eine angepasste Parameterverknüpfung berücksichtigt werden.

Die Datenfusion von mehreren relevanten Parametern aus Offline- und Echtzeitquellen über Unschärfelogik sollte im Vorhaben durch Expertenwissen erfolgen. Dazu war es notwendig, Messdaten der angedachten Versuchsflächen anzuschauen und mit den Ertrags- und, soweit vorhanden, den Boniturdaten der vergangenen Jahre abzugleichen. Die Art und Stärke der Zusammenhänge zwischen den PF Messgrößen und den eigentlichen Zielgrößen, den entscheidenden Parametern im Pflanzenbau, muss klar und stabil sein, damit diese in den sogenannten Fuzzysets dargestellt werden kann. Deswegen wurden die in der Matrix dargestellten Situationen der verschiedenen Bestände genauer definiert:

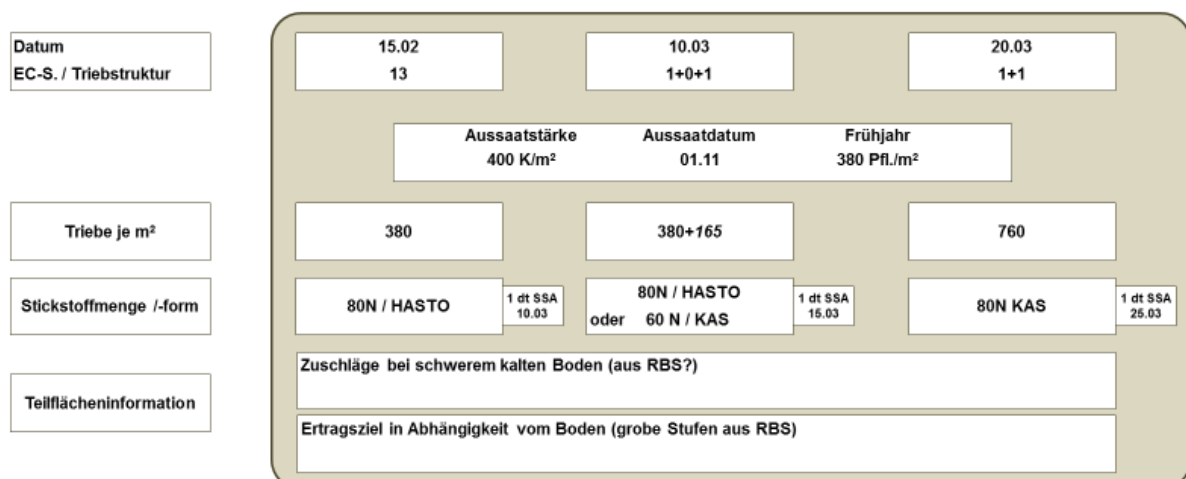


Abbildung: Entwicklung des gering entwickelten Weizenbestandes und resultierende Stickstoffdüngempfehlung

Je nach Zeitpunkt der Düngung und Entwicklung des Bestandes ergeben sich teilweise konträre Ableitungsregeln. Im dargestellten Beispiel wird über einen Zeitraum von über vier Wochen mit in ihrer Wirkung unterschiedlichen Düngerformen und verschiedenen Mengen gearbeitet. Eine generelles Schlussfolgerungssystem ist in der Aufstellung kritisch, wird jedoch für die Anwendung der Fuzzylogik benötigt. Es besteht aus pflanzenbaulicher Sicht die deutliche Gefahr einer Fehlentscheidung. Diese Schaubilder wurden für alle Situation aus der Entwicklungsmatrix aufgestellt und durch die Hanse Agro zur Diskussion gestellt. Weiterhin wurde neben dem Stickstoffbedarf von Winterweizen im Verlauf der Vegetation pflanzenbauliche Entscheidungsparameter und Abhängigkeiten dieser untereinander definiert und erläutert:

Stickstoffbedarf in Abhängigkeit vom Ertragsniveau bei Winterweizen

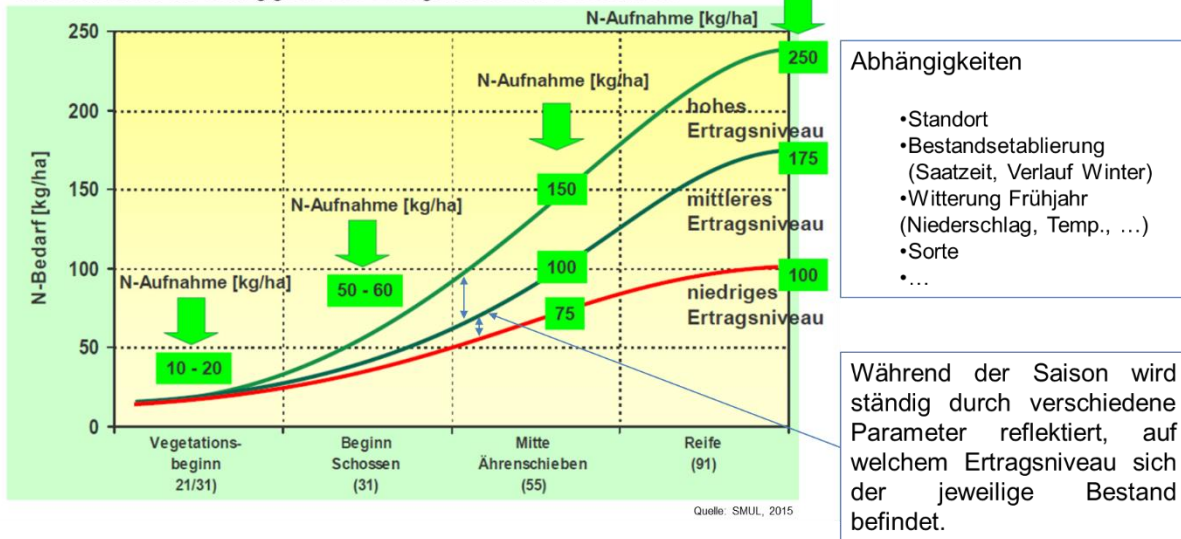


Abbildung: Stickstoffbedarf von Winterweizen im Frühjahr bei unterschiedlichen Ertragsniveaus

Es wurde erörtert, die durch die Hanse Agro vermittelten Informationen als Entscheidungssystem zur Feststellung einer schlageinheitlichen Düngungsmenge vorzuschalten. Dabei sollten als Eingangsparameter die im Getreidebau üblichen Boniturparameter verwendet werden, welche sich wie folgt zu den verschiedenen Düngungszeitpunkten darstellen lassen:

- | | |
|---|---|
| <p>1. N</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeitpunkt der Düngung • Entwicklung zum Düngetermin • Pflanzen/ m² (bzw. Saatstärke) • Saatzeit • Düngerform • (Ertragsziel) • (Einsatz von Organik) • Nmin 0-30 | <p>2. N</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeitpunkt der Düngung • Entwicklung zum Düngetermin • Pflanzen/ m² Was wurde bisher gemacht? • Wie hat es gewirkt? • Ertragsziel • Nmin 30-60 • mobilisierbarer Stickstoff • Bodenfeuchte • Düngerform • Was bleibt noch für ggfs. N3 übrig? |
| <p>3. N</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeitpunkt der Düngung (EC Stadium) • Wasserverfügbarkeit • Ist das Ertragsziel anzupassen? • Düngerform • (Entwicklung zum Düngetermin) | |

Eine direkte Korrelation zwischen diesen Boniturparametern und den Messwerten der PF-Messsysteme konnte auch im vorliegenden Projekt wiederholt nicht dargestellt werden. Diese Tatsache kombiniert mit der Vielzahl an Einflussgrößen und der gewünschten Unschärfe der Parameterverknüpfung führte die pflanzenbauliche Nachvollziehbarkeit und die Validität des aufgestellten Düngesystems klar an Grenzen.

Im Rahmen des AP 5.1 wurde im Frühjahr 2019 der erste Feldversuch auf der Versuchsstation der Universität Hohenheim mit betreut. Da mit einer zum Teil vor der eigentlichen Düngung durchgeführten Simulation die Umsetzung des Düngesystems getestet werden sollte, wurden im Vorfeld die zur Verfügung stehenden Daten ausgewertet. Mit nicht relevanten Korrelationen von -0,12 bis 0,1 zwischen aus der schlageinheitlichen Düngung resultierenden Ertragsdaten, den Sensormessungen zu den Düngungszeitpunkten sowie der EM38 Messungen sind gewünschte Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen nicht nachzuvollziehen gewesen. Auch die Flächenstruktur der Daten vermittelte einen ähnlichen Eindruck:

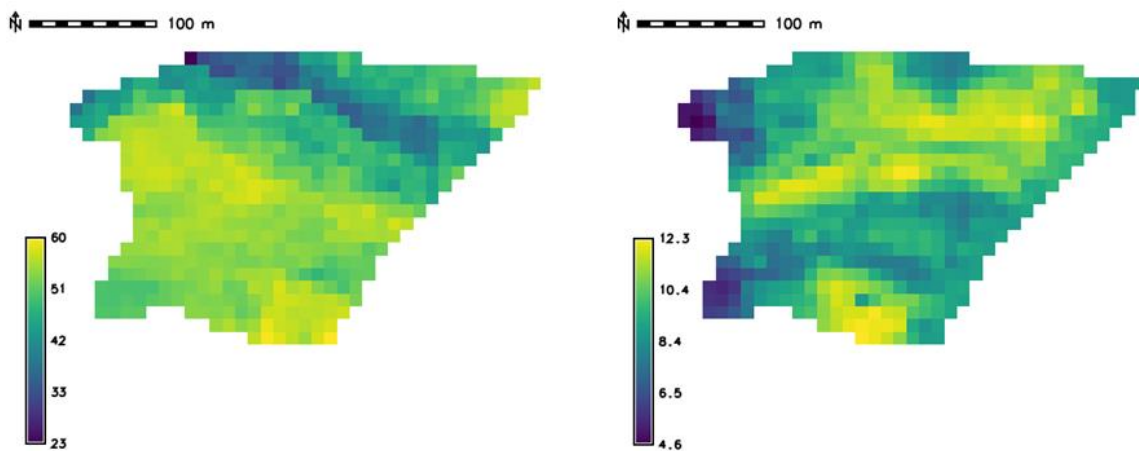


Abbildung: interpolierte Messwerte EM 38 (mS/m) sowie Ertragswerte (t/ha, 02.08.2019)

Die von BERNTSEN et. al. (2006) aus Schätzalgorithmen ermittelten deutliche Zusammenhänge zwischen ECa- bzw. SN-Werten und dem Ertrag, aus den Daten kaum deskriptiv nachvollzogen werden. Es blieb zu erörtern, welche Bedeutung ein ermittelter statistischer Zusammenhang im Bereich des Pflanzenbaus haben kann. Nach visueller Betrachtung der Versuchsschläge und Auswertung der Korrelation waren diese anscheinend nicht vorhanden.

Um die Parameterzusammenhänge besser nachvollziehen zu können, wurden die Boniturdaten an verschiedenen Stellen im Schlag ausgewertet:



Abbildung: Boniturstellen vor interpolierten Ertragswerten (02.08.2019). Versuchsflächen Ihinger Hof

Die ausgewählten Boniturstellen sind ertraglich von mittel über hoch bis hin zu relativ gering einzustufen:

Tabelle: Bestandesansprache zu EC 31, Sensormesswerte (SN) im Frühjahrsverlauf und Ertragswerte

Boniturstelle	Pflanzen je qm	Triebstruktur 25.04.19	ECa [mS/m]	Bodenart und RBS BZ	SN 01.05.	SN 01.06 / 31.05	Ertrag 02.08.19 [t/ha]
5	213	1+1+1	54,4	L 47	58,8	131,8	9,5
8	193	2+2+3	74,3	LT 55	60,3	117,2	10,2
11	193	1+2	69,7	LT 55	42,7	117,2	8,8

Es konnte zusammengefasst werden, dass die vorhandenen Zusammenhänge nicht linear sind und Erklärungsansätze wie eine zu tiefe Ablage des Saatgutes, eine begrenzte Kornfüllungsphase oder ein Entwicklungsdefizit zu Vegetationsbeginn nicht zu einem klaren Muster führten. Deswegen wurde die Entwicklungsmatrix erneut konstituiert, jeder Düngungstermin steht für sich und es soll zu diesem der für den Bestand in der Teilfläche notwendige Stickstoff ausgebracht werden. Diese Möglichkeit bietet das entwickelte Düngungssystem in einer sehr

weit gefächerten Vielfalt und Tiefe, was als wesentliche Neuerung und als wesentlicher Vorteil hervorzuheben ist. Während BOURUBI et. al. (2011) diese Zielgrößendefinition unter anderem ökonomisch ex post führt, sollte im Projekt online bedarfsorientiert gearbeitet werden. Dies kann zu gleichem Ertrag bei geringerem Stickstoffeinsatz, oder höherem Ertrag bei höherem Stickstoffeinsatz aber auch zu gleichem Ertrag bei höherem Stickstoffeinsatz führen. Gerade der letzte Punkt darf möglichst nicht eintreten, da die Düngeverordnung klare Regeln für die Düngung von Kulturpflanzen und somit auch Grenzen vorgibt.

Im Frühjahr 2020 wurde durch die Hanse Agro ein Großflächenversuch auf der Domäne Bahrdorf im Landkreis Helmstedt durchgeführt. Ausgehend von der Parameterdiskussion im Herbst 2019, in der dem EM 38 ein Wichtungsfaktor zugeteilt wurde, sollte so die Parameterknüpfung durch einen on-farm Research Versuch geprüft werden.

In dieser Parameterdiskussion wurde im Vorfeld im AP 2 (FMIS und Fuzzylogik) die Anwendung der Fuzzy-Logik-Methoden für verschiedene Situationen aus jahresbedingter pflanzenbaulicher sowie standortgebener Prämisse mit den Projektpartnern eingehend diskutiert. Dies fand sich im AP 2.1 in bilateraler Diskussion zwischen HAAG und UHOH eingehend wieder. Aus den pflanzenbaulichen und standorttreuen Gegebenheiten wurden Zusammenhänge erläutert und für eine Verknüpfung der Parameter bewertet. Das Ergebnis dieser Bewertung wurde im AP 2.2 in mehreren unterschiedlichen Simulationen als Entwurf für einen Entscheidungs- und Fusionsalgorithmus zusammengeführt. Die Aussage, dass generell hohe Messwerte repräsentativ für eine gute Ertragsfähigkeit sind, ist falsch. Während in Bahrdorf hohe EM 38 Messwerte für eine gute Ertragsfähigkeit stehen, lassen auf dem Ihinger Hof niedrige Werte eher eine hohe Ertragsfähigkeit erwarten. Löst man sich jedoch von den absoluten Messwerten der EM 38 Leitfähigkeitsmessung und nutzt die relativen Unterschiede für eine Zonierung, bei der durch Expertenwissen jeweils die Situation individuell neu einschätzt wird, ist der Parameter EM 38 für den Fuzzy-Algorithmus durchaus zu verwenden.

Durch die Leitfähigkeitsmessung können unterschiedliche Bodensituationen im Sinne von „gut, mittel, schlecht“ abgegrenzt werden. Die Reaktion der einzelnen Zonen auf die Ertragsfähigkeit des aktuellen Jahres und damit die notwendige Düngung, ist zu den einzelnen Düngungszeitpunkten vom Landwirt mit seiner Expertise über die Fläche neu zu beurteilen. Durch den eingeführten Wichtungsfaktor können im Fuzzysset die EM 38 Daten für die Zonierung genutzt werden und auch verschiedene Szenarien wie zum Beispiel ein trockenes und ein feuchtes Jahr berücksichtigt werden. So fanden sich auf der Versuchsfläche leichte, sandige Bereiche, schwere, tonige Zonen, aber auch humose Senken und milde, sandige Lehme. Die unterschiedlichen Bodentypen lassen mit der EM 38 Leitfähigkeitsmessung klassifizieren. Eine qualitative Einschätzung der reinen Messwerte stand allerdings im Widerspruch zur Klassifizierung nach der Reichsbodenschätzung und der Betriebsleitererfahrung vor Ort. Eine Übertragbarkeit

der Einschätzung der jeweiligen Teilfläche anhand ihrer absoluten Messwerte auf andere Flächen ist nicht machbar.

In der nachfolgenden Abbildung sind die 12 in der Mitte geteilten Fahrgassen dargestellt, welche dann in Summe 24 Versuchspartellen auf einer Fläche von circa 25ha Fläche ergeben haben.

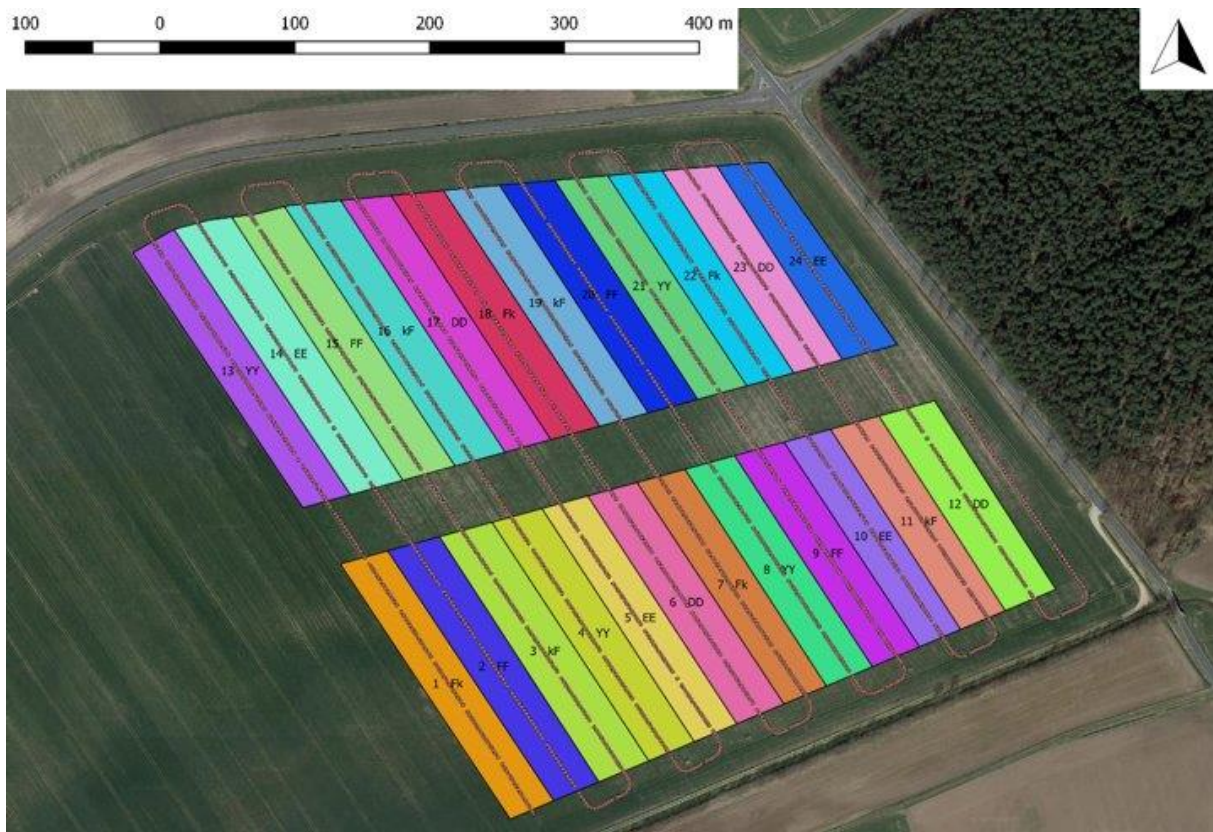


Abbildung: Versuchspartellen auf der Fläche Kleibreite, Versuchsjahr 2020

Neben der Fuzzy Variante wurde eine konstante, eine Variante nach YARA N-Sensor® (betriebsüblich), eine konstante Düngung nach den Durchschnittswerten des YARA N-Sensors, sowie eine Düngung nach dem EM38 in verschiedenen Kombinationen der 2. und 3. Stickstoffgabe geprüft. Um den Anforderungen der Daten (z.B. Autokorrelation, zum Teil Varianzheterogenität, Extremwerte) gerecht werden zu können, ist ein gemischtes Modell mit einer räumlichen Korrelationsstruktur aufgestellt worden. In diesem ist es möglich zufällige Effekte (nicht beeinflussbar) von den festen Effekten (Versuchsfaktoren, hier die Stickstoffdüngung) in ihrem Einfluss auf die zu untersuchende Zielgröße (Ertrag bzw. Stickstoffbilanz) zu trennen. Mit dieser Modellerstellung und den nachfolgenden Interpretationen und post hoc Tests soll ausgewertet werden, ob die Effekte der Düngungsvarianten zufällig im Schlag vorhandenen Schwankungen unterliegen, oder tatsächlich durch den Versuchsfaktor begründet werden. Die

Aufbereitung der Daten erfolgte im GIS. Es wurden die Messpunkte der Ertragskartierung als Punktdaten ausgewertet. Für die Berechnung der N-Bilanz wurden die Ertragspunkte in ein Raster von 5 m interpoliert. Nach Berechnung der Stickstoffbilanz für die einzelnen Rasterzellen wurden deren Werte ausgelesen und in der Modellbildung ausgewertet.

In der Auswertung der Erträge konnte ebenso keine Signifikanz erzielt werden, wie bei der Auswertung der N-Bilanz. Wenn bewusst unscharf gearbeitet wird, führt dies anscheinend zu einem gemischten Ergebnis. In diesem lassen sich die Effekte der untersuchten Faktoren in den Varianten relativ schwierig interpretieren. In der Bewertung der Fuzzy-Sets stellten sich, bedingt durch die Eingangparameter YARA N-Sensor® und EM 38, gegenläufige Empfehlungen und in Summe nivellierende Düngemengen heraus. Es ergaben sich verschiedene denkbare Szenarien, wie zum Beispiel die Betonung der Bodeninformation bei der ersten Stickstoffgabe, andere Wichtungen der Eingangparameter zur zweiten Stickstoffdüngung sowie ein Szenario einer mittelfristigen Wasserversorgung. Die Umsetzung solcher denkbaren Szenarien scheitert aber bisher regelmäßig an aussagekräftigen und räumlich gut aufgelösten validen Messdaten bzw. an der Verfügbarkeit geeigneter Messsysteme für die Bodenparameter.

Die Verknüpfung verschiedener Parameter über ein Fuzzy-Inferenzsystem brachte neben großen Herausforderungen bei der Aufstellung großes Potential mit sich. Die Verknüpfungen zwischen stetigen und diskreten Parametern aber auch zwischen Jahreseffekten und zeitlich weniger begrenzten Informationen oder Merkmalen, welche verschiedene Skalierungen aufweisen, aber ähnliche Informationen beinhalten werden greifbar.

Die Verwendung der verfügbaren Messdaten hat im Versuch 2020 Grenzen aufgezeigt, sollte aber im Frühjahr 2021 erneut geprüft werden. Dazu wurde erneut ein on-farm Research Versuch bei der Herzglichen Gutsverwaltung Grünholz im Landkreis Rendsburg-Eckernförde, Schleswig-Holstein angelegt. In der Vorplanung wurden im Schlag neben der Restfläche (3) eine Sandlinse (1) mit niedrigem Ertrag, eine Senke (4) mit hohem Ertrag sowie ein mittlerer Bereich (2) mit durchschnittlichem Ertrag festgelegt:

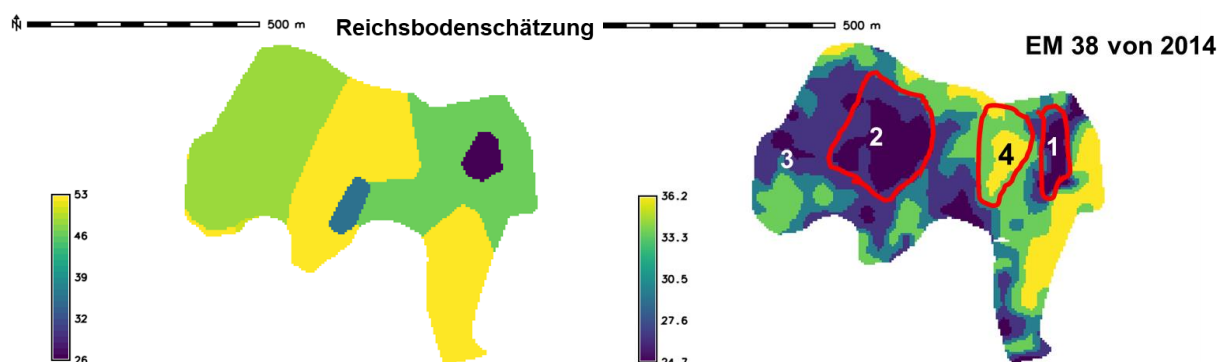


Abbildung: Versuchsfläche Tarbrück 2021. Links Zonen unterschiedlicher Bodenwertzahlen, rechts EM38 Messwerte von 2014

Es wurden erneut die sechs Varianten aus dem Versuch 2020 in vierfacher Wiederholung angelegt:

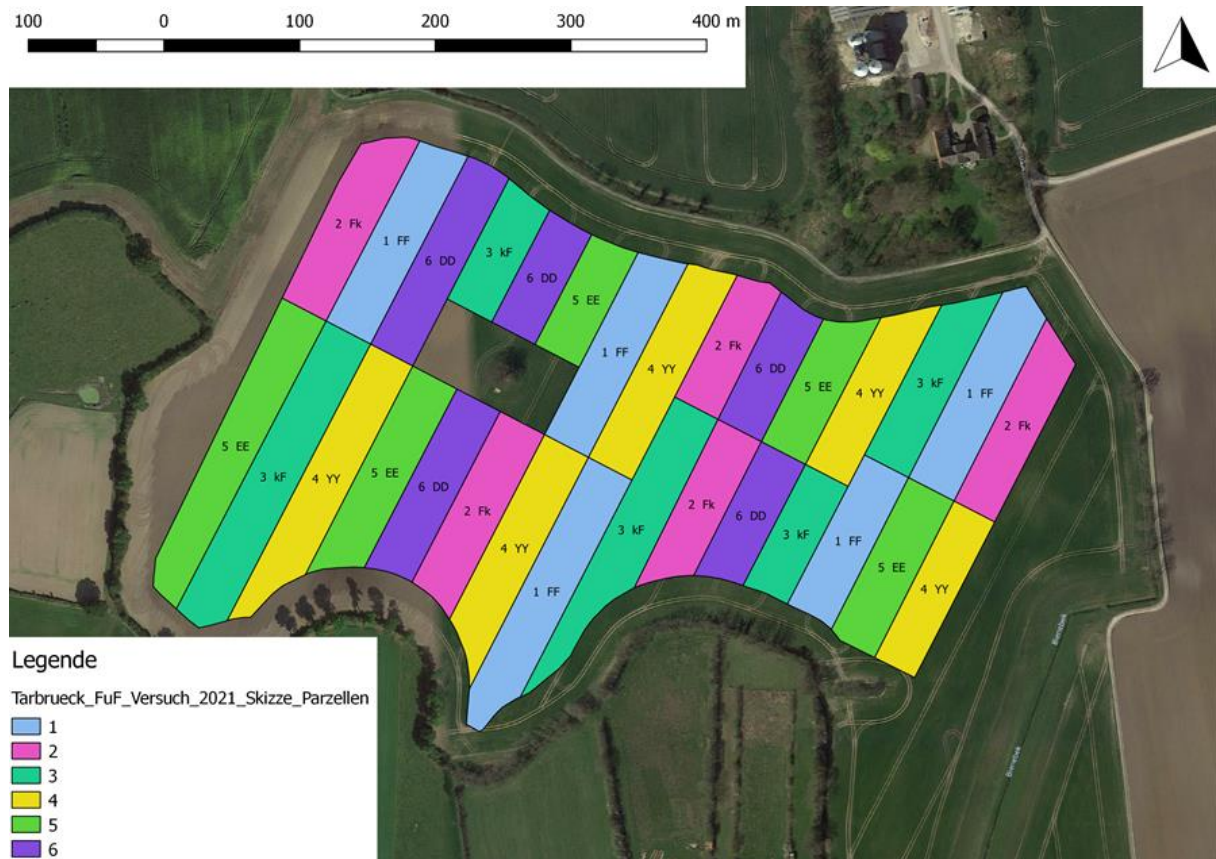


Abbildung: Versuchspartellen auf der Fläche Tarbrück, Versuchsjahr 2021

Unabhängig der Einteilung in Parzellen wurden für die oben beschriebenen Teilflächen Düngelplanungen erstellt und die Auswirkungen der Eingangsparameter in diesen analysiert. So ist bei der Planung der YARA N-Sensorvariante zu erkennen gewesen, dass die Sandlinse (1) durch den Sensor überdüngt wird, die Senke mit dem höheren Ertrag (4) jedoch nicht voll ausgedüngt wird. Diesen Effekten konnte in der Fuzzyvariante durch die Bodenzonen entgegengewirkt werden, was allerdings durch eine andere Einstellung des YARA N-Sensors® auch möglich gewesen wäre.

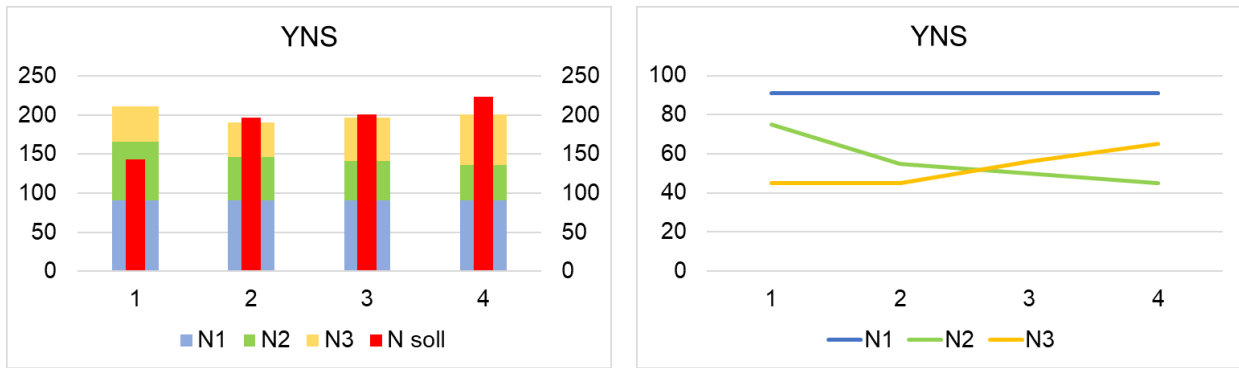


Abbildung: links Darstellung der Stickstoffdüngung in den Ertragszonen (1-4) in der Variante YARA N-Sensor®. Rote Balken zeigen N_{soll} Menge an. Die gestapelten Balken die nach YNS resultierende N-Menge in kg N /ha zu den drei Terminen (N1, N2, N3). Rechts die Regelkurven für die unterschiedlichen Düngungstermine.

Im rechten Bereich der Darstellung sind die Regelkurven der verschiedenen Düngekurven dargestellt. Die N2 (viel Stickstoff bei wenig Biomasse) verläuft im Sensoralgorithmus gegensätzlich zur Qualitätsregelkurve (viel Stickstoff bei viel Biomasse). Mit der N3 hätte die offene Düngermenge bei üblicher Einstellung nicht ausgleich werden können, was im linken Säulendiagramm an Säule 4 (Senke mit höherem Ertrag) zu erkennen ist.

Durch die Witterungseinflüsse wurde im weiteren Verlauf des Frühjahres festgestellt, dass sich die Ertragserwartung in der Zone 1 ändert (mittleres bis trockenes Jahr hin zu einem nassen Jahr). Durch diese Änderung wäre in der N3 eine angepasste Regelung notwendig gewesen, was der N-Sensor in seinen Einstellmöglichkeiten nicht umsetzen kann:

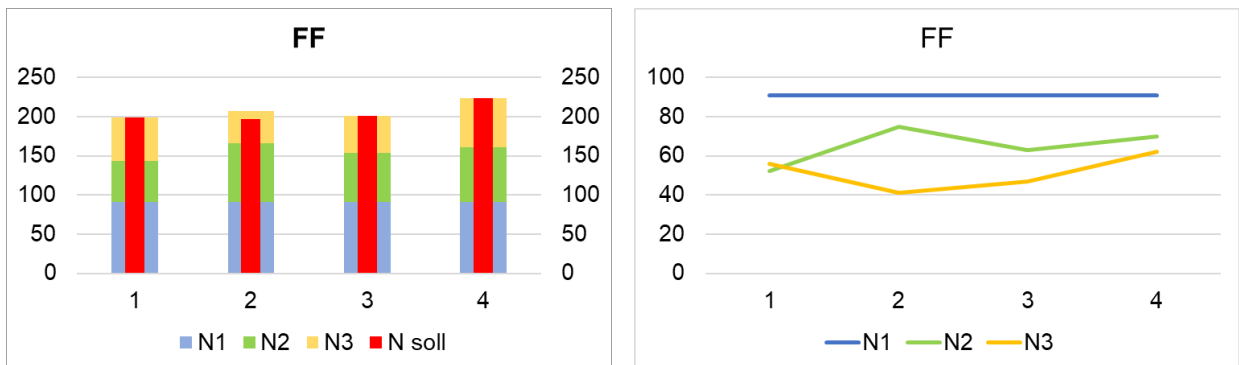


Abbildung: links Darstellung der Stickstoffdüngung in den Ertragszonen (1-4) in der Variante Fuzzy Farmer. Rote Balken zeigen N_{soll} Menge an. Die gestapelten Balken die nach FuzzyFarmer resultierende N-Menge in kg N /ha zu den drei Terminen (N1, N2, N3). Rechts die Regelkurven für die unterschiedlichen Düngungstermine.

Die gelbe Regelkurve (N3) verläuft parabelförmig. Die Zonen mit geringer und hoher Ertragserwartung bzw. Biomasse zum Zeitpunkt der Düngung erhalten mehr Stickstoff.

Doch woher können diese Erkenntnisse abgeleitet werden? Leider standen im Versuch 2021 keine Erntedaten zur Verfügung, sodass eine Auswertung der Erträge und der N Bilanz nicht möglich gewesen ist. Jedoch wurden die verfügbaren Sensormessungen zu den jeweiligen

Düngungszeitpunkten ausgewertet, um die Entwicklung des Bestandes auf den im Vorfeld des Versuches eingeteilten Zonen nachvollziehen zu können:

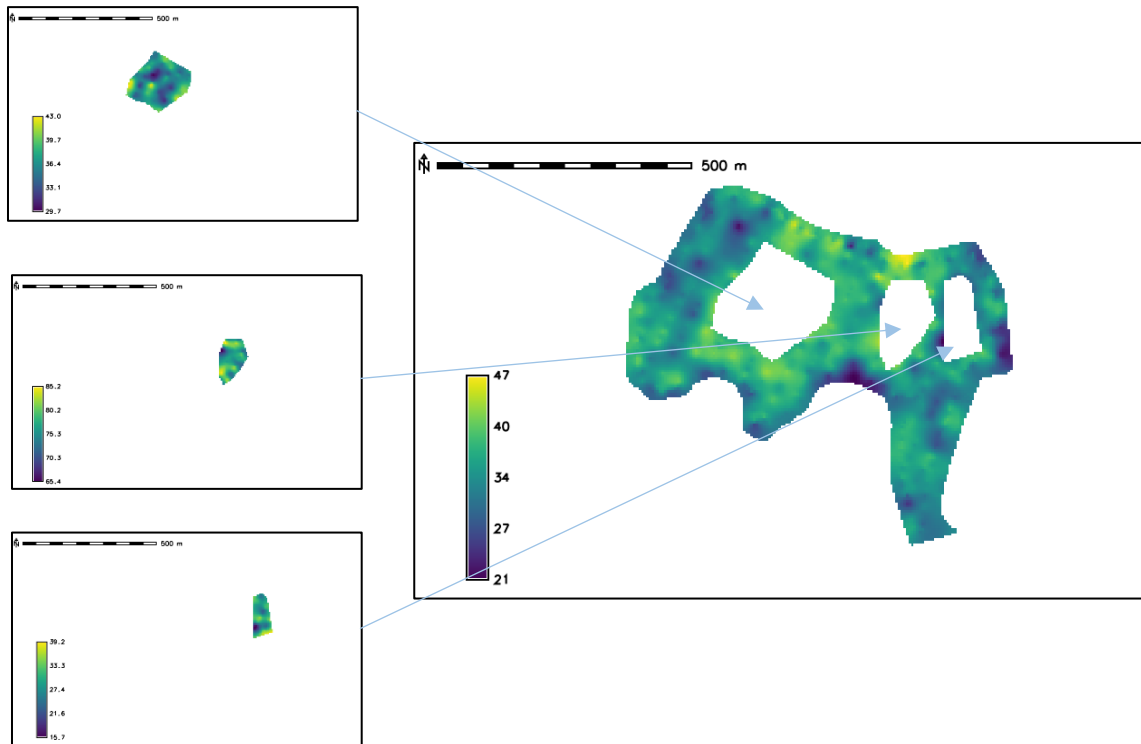


Abbildung: Auswertungsbereiche des Schlages Tarbrück, aus der Gesamtfläche herausgeschnitten (interpolierte Ertragsdaten)

Für diese Bereiche wurden Rasterflächenauswertungen durchgeführt und die Mittelwerte der Sensormesswerte dargestellt:

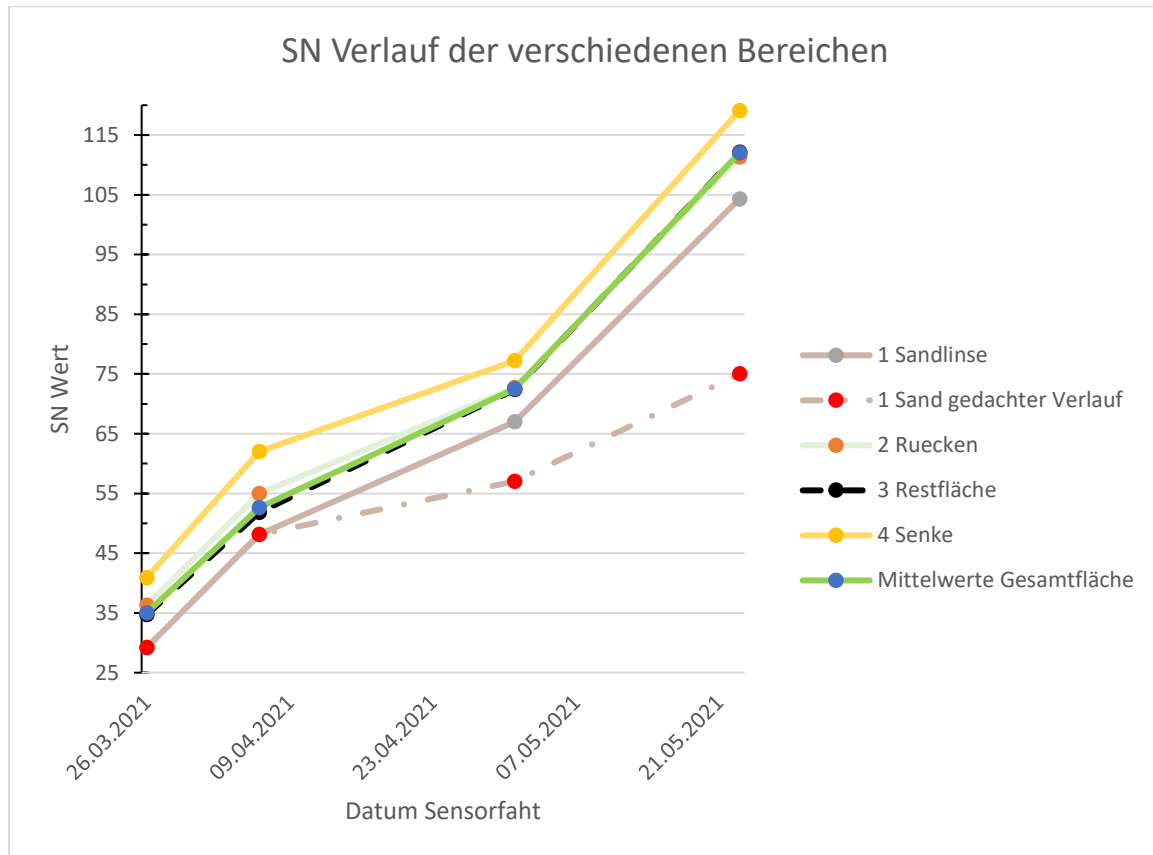


Abbildung: Verlauf der SN-Messwerte über das Frühjahr in den unterschiedlichen Zonen

Genau die oben diskutierte Entwicklung ist demnach auf der Sandlinse eingetreten. Der Bestand hat sich wesentlich besser entwickelt, als dies in der Planung angenommen wurde. Die unterbrochene braune Linie wäre der in der Planung angedachte Verlauf der Bestandesentwicklung und die durchgehende Linie zeigt den tatsächlichen Verlauf an. Dieser überraschende Verlauf ist auch den pflanzenbaulichen Experten neu und so konkret bisher auch noch nicht berücksichtigt worden. Mit dem Fuzzydüngesystem wäre es theoretisch möglich diesen Witterungseinflüssen kurzfristig gerecht zu werden, da reagiert werden kann.

Durch das im Konsortium entwickelte Userinterface wäre diese Reaktion auch viel einfacher umzusetzen, leider stand dieses erst zum Projektende im Herbst 2021 zur Verfügung. Die Möglichkeiten der klassifizierten Darstellung der Eingangsparameter macht die Reaktion auf geänderte Witterungseinflüsse und die Einflüsse der Parameter auf das Düngesystem greifbar und der Pflanzenbauexperte kann die Eingangsgrößen dementsprechend besser interpretieren. Weiterhin macht die dargestellte Simulation der Düngungsmengen Sinn, da so die resultierende Applikationsmenge erst validiert werden kann. Dieser Werkzeuge standen der Hanse Agro in der Projektphase leider nicht zu Verfügung, sodass zum Teil iterativ vorgegangen

werden musste, was bei den on-Farm Research Versuchen durchaus auch mit einem Risiko einer Fehldüngung verbunden war.

II 3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die intensive Arbeit mit den Eingangsparametern ist als Grundlage für die Entscheidungsmatrix zu bezeichnen. Zu Beginn des Vorhabens immer wurde wieder scharf diskutiert, ob die Beziehungen zwischen Ertrag EM 38 und YARA N-Sensor® den so konkret vorhanden oder klar sein müssen, oder ob der Experte die Parameter aus der Standorterfahrung heraus einschätzen kann. In der konkreten Arbeit im Versuch 2019 am Ihinger Hof, der angegliederten Beratung der Hanse Agro sowie der Auswertung nach der Ernte im Sommer 2019 sollte die Auseinandersetzung mit den Parametern sich nicht nur als angemessen, sondern als essenziell notwendig herausstellen. Es wäre sonst schlichtweg nicht möglich gewesen die Entscheidungsmatrix aufzustellen bzw. in der Anwendung des Düngesystems zu bedienen.

Wie aus dem vorangegangenen Kapitel (II 1 und II 2) ersichtlich wird, bestätigte sich die im Vorfeld erwähnte Vermutung, dass neben dem Ihinger Hof weitere Versuchsbetriebe zur Validierung des Fuzzy-farmer-Ansatzes benötigt werden. Diese stammten in den beiden Jahren aus dem Kundenkreis der Hanse Agro, auf denen schon langjährig verschiedene On-farm-Versuche durchgeführt wurden. Somit konnte zielgerichtet und kostenoptimiert für das Projekt Fuzzy-farmer auf die Erfahrung der Landwirte mit Großflächenversuchen aufgebaut werden. Die Erkenntnisse über die entwickelten Düngevarianten auf anderen Standorten zu testen, brachten neue Ebenen in die Bewertung des Systems. Die Art Verwendung der EM38 Messwerte im Entscheidungsalgorithmus, schließlich gab es an verschiedenen Standorten unterschiedliche Interpretationen der Leitfähigkeitsmesswerte, sowie die überraschende Entwicklung des Weizenbestandes im Frühjahr 2021 sind hier als Beispiel zu nennen. Leider sind in den On-farm Versuchen nicht die erhofften Ergebnisse zu verzeichnen gewesen, bzw. konnten nicht alle Daten ausgewertet werden. Dies führt zu der Erkenntnis, dass durchaus weitere Versuche anzustreben wären, um die ersten Erkenntnisse weiter zu vertiefen. Die zu Beginn des Vorhabens dargestellten Grundlagen bildeten eine Diskussionsgrundlage und sozusagen die Kontaktfläche, auf der die weiteren Diskussionen in die pflanzenbauliche Ebene überführt wurden. Gerade für die disziplinfremden Projektpartner sind diese Darstellungen von hohem Wert gewesen. Genauso ist es der Hanse Agro in den anderen Ebenen der Projektpartner ergangen. Es konnte erfolgreich für die Notwendigkeit verschiedener Entscheidungen im Pflanzenbau und auch für die terminliche Dringlichkeit sowie ökonomische und ökologische Relevanz der Düngemaßnahmen geworben werden. Nur bei Beachtung dieser Kernpunkte kann schließlich auch ein Effekt des entwickelten Düngesystems erwartet werden.

II 4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Mit der Düngebedarfsermittlung werden schlagspezifische, maximale Obergrenzen in der Stickstoffdüngemenge ermittelt. Es ergeben sich aber durchaus Situationen, in denen allein durch eine Optimierung der Umverteilung auf der Fläche deutliche Effizienzsteigerungen in der Stickstoffausnutzung sowie in gewissem Maße auch wirtschaftliche Ertragsvorteile erwirtschaften lassen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Entwicklung der Pflanzen anhand der Stickstoffaufnahme mittels Onlinesensorik sowie die Ertragsfähigkeit des Bodens exakt erfasst werden und bewertet werden können. Die schlageinheitliche Deckelung der maximal möglichen Stickstoffmenge ist dann gerade in Hohertragszonen hinderlich, da der ihr zu Grunde liegende schlageinheitliche Ertrag die Ausdüngung dieser Zonen verhindert. Dem Anwender wird im Anschluss aber nur eine Applikationskarte für die teilflächenspezifische Stickstoffdüngung übergeben, in welcher diese Effekte meist gar nicht konkret auffallen.

In der täglichen Arbeit der Hanse Agro Berater fließen weitere Informationen, wie bspw. Zielertrag, Bodengüte, Nachlieferungspotenzial aus dem Boden sowie die aktuelle Entwicklung der Pflanzen ein. Dies wird bisher im Rahmen einer auf die Fläche oder Bewirtschaftungseinheit angepassten Empfehlung an die Kunden herangetragen. Diese Expertise wurde in das Forschungsprojekt Fuzzy-farmer eingebracht. Die Umsetzung der grundlegenden Gedanken aus der Dünge-Bedarfs-Analyse, die von Seiten der Hanse Agro ohnehin mit den Betrieben auf Schlagebene durchgeführt wird, in die Ebene der Teilflächenbewirtschaftung unter Nutzung des fuzzy-logic Ansatzes, erfordert ein web-basiertes Userinterface.

Der erste Ansatz für diese Umsetzung wurde zum Projektende durch die Firma Disy Informationssystem GmbH vorgestellt. Das aus diesem Interface resultierende Potential wäre in weiteren Versuchen zu prüfen und dem ersten Eindrücken nach auch ohne großen Aufwand auf Praxisschlägen verwendbar.

Deswegen wurde seitens der Hanse Agro auch eine Verlängerung des Projektes klar begrüßt. Im Rahmen dieser wäre eine weiter Prüfung des Ansatzes auf weiteren Standorten sowie in einer intensiveren Ebene durchgeführt worden.

II 5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekanntgewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Das von RATJEN (2012) entwickelte und auf der Webplattform von ISIP implementierte Modell HumeWheat ermöglichte unter Berücksichtigung von ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten die Stickstoffdüngung von Winterweizen auf Ebene des Schlages an das jeweils jahresspezifische Ertragspotential anzupassen. Es wurden Schlaginformationen wie Ertragsniveau, Bodenart, Vorfrucht sowie angestrebter Proteingehalt berücksichtigt. Unter zur Hilfenahme von Modellierungsverfahren konnte das Ertragsniveau anhand der abgelaufenen und vermutlich bevorstehenden Witterung zu jedem Düngezeitpunkt neu justiert werden. Dafür wurde zu jedem relevanten Düngezeitpunkt die bisherige Witterung mit Vergleichsjahren in Relation gesetzt, um damit eine Prognose für die zukünftige Witterung zu tätigen. Das Modell HumeWheat hat konkrete Vorschläge zum Düngezeitpunkt aber auch zur Düngungsmenge pro Termin getätigt. Mit Inkrafttreten der novellierten Düngeverordnung 2017 und damit der Einführung der verpflichtenden Düngebedarfsermittlung sowie Festlegung von Stickstoffobergrenzen, die über das langjährige Ertragsmittel gebildet wurden, finden die jahresspezifische Entwicklungen oder Möglichkeiten keine Berücksichtigung mehr. Deswegen wurde das Modell HumeWheat leider von der Plattform ISIP entfernt. Mit Hilfe des Modells HumeWheat wäre eine Einschätzung oder Prognose des jahresindividuellen Ertrages auf Ebene des Gesamtschlages zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der laufenden Vegetation möglich gewesen. Diese Grundinformation hätte auch als Einflussgröße in das Düngungsmodell FuzzyFarmer eingebunden werden können, bei dem die Stickstoffdüngung mit Hilfe des mehrparametrischen Ansatzes unter Verwendung der fuzzy-logic in die Teilfläche der Schläge übertragen worden wäre.

Im Austausch mit der TU München konnte festgestellt werden, dass teilschlagspezifische Systeme je nach Art und Methode in ihren Qualitäten und den Vorteilen differenzieren. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass Verfahren welche Onlinemessungen bzw. Onlineverfahren mit Offlinedaten in einem Mapoverlay kombinieren hohe Präzision erreichen können (PRÜCKLMAIER (2020), SCHMIDTHALTER (2014), MAIDL ET AL. (2004)). Ähnlich Erfahrungen wurden im eigenen Vorhaben gemacht. Kernpunkte der Diskussionen sind dabei die Themen Praxistauglichkeit, Düngeeffizienzsteigerungen aber auch Qualität bzw. die Qualitätsunterschiede von bzw. zwischen Satelliten und Sensorsystemen in der Erfassung der Biomasse als Eingangparameter für die untersuchten Düngungssysteme. Während die TU München unter anderem Systeme mit Berücksichtigung des Ertragspotentials des Bodens bzw. weiterer Nährstoffe aus dem Bereich der Grunddüngung sowie verschiedenen Systemen zur Quantifizierung der Biomasse erörtert, konnte für das eigenen Vorhaben festgehalten werden, dass die Verknüpfung der Parameter in Ihrer Flexibilität das absolute Alleinstellungsmerkmal darstellt. Sicher ist die Verwendung der EM 38 Daten zur Abschätzung der Bodengüte stark diskutiert

worden und die Messwerte des YARA N-Sensors® wurde als adäquat betrachtet. Auf der anderen Seite kann die Fuzzy Methodik aber auch mit anderen Eingangsparametern verwendet werden. So könnten auch Potentialzonen aus anderen Messdaten berücksichtigt werden und die im Düngesystem verwendeten Biomassewerte könnten ebenso durch satellitenbasierte Eingangsparameter ersetzt oder eben auch ergänzt werden. Festzuhalten bleibt, welche Parameterkonstellation, die aus pflanzenbaulicher Sicht passendste darstellt. Die Schnittmengen des Fuzzysystemes zu anderen Düngesystemen ist aber dennoch höher als am Anfang meist vermutet wird.

Im Bereich der Verwendung von Fernerkundungsdaten werden immer wieder durch die Anbieter die Möglichkeiten eines Mapoverlays hervorgehoben. Diese klassische GIS Operation mit linearen Zusammenhängen oder Verwendungen von historischen klassifizierten Daten (z.B. Ertragspotentialkarten) lässt sich jedoch nicht mit den Möglichkeiten des entwickelten Düngesystems vergleichen. Denn bei diesem wird durch die zum Düngzeitpunkt eingestellte Parameterverknüpfung online eine Applikationsmenge ermittelt. Diese Art der Berechnung von Düngermengen ist so nicht verbreitet, vielmehr werden am Markt der Precision Farming Produkte mit Messsysteme zur Bestandes- und Bodenansprache angeboten, die zum Beispiel als Eingangsparameter für den im Projekt entwickelten mehrparametrischen Ansatz dienen könnten oder eben als einparametrischer Ansatz angewendet werden können.

II 6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Die aus dem Forschungsprojekt gewonnen Ergebnisse werden den Kunden der Hanse Agro auf Tagungen, Feldtagen und im direkten Beratungsgespräch zur Verfügung gestellt. Weiterhin wird der Abschlussbericht im kundeninternen Bereich der Hanse Agro Website einsehbar sein.

Darüberhinausgehende Veröffentlichungen, gerade im Bereich der wissenschaftlichen Zeitschriftenreihen erfolgen in enger Absprache mit der Gesamtprojektverantwortlichen.

III. Erfolgskontrollbericht (nicht öffentlich)

**** Nicht öffentliche Angaben zum Erfolgskontrollbericht sind in dieser Veröffentlichung entfernt ****

IV. „Kurzfassung“

Im Projekt Fuzzy Farmer wurde durch die Hanse Agro auf dem Weg von einem Entscheidungsalgorithmus über den Fusionsalgorithmus bis hin zum Applikationssystem an verschiedenen Stellen pflanzenbauliches Wissen zur Darstellung von Grundlagen und zur Untermauerung der Hintergründe eines praktikablen Düngesystemes vermittelt.

Neben den Systemgrenzen wurden die Entwürfe der Entscheidungs- und Fusionsalgorithmen mitgestaltet und bewertet. Dazu wurde intensiv an der Visualisierung der pflanzenbaulichen Entscheidungsprozesse der Getreidedüngung und auch an der gedanklichen Überführung dieser in eine Fuzzylogik gearbeitet. Ausgehend von einer beratenden Tätigkeit bei den ersten Praxiserprobungen und Messfahrten auf dem Ihinger Hof im Frühjahr 2019 und der Betreuung des ersten Düngeversuches im Frühjahr 2020 wurden eigene on-farm research Versuche in Zusammenarbeit mit Kunden der Hanse Agro durchgeführt.

Zwar konnten sich die Düngungsvarianten des Fuzzy Farmer Ansatzes nicht signifikant absetzen, doch sind die Eindrücke und Ergebnisse aus den Versuchen prägnant und zum Teil sogar überraschend gewesen.

Im Rahmen des Projektes konnten Erfahrungen in der Bewertung von Eingangsfaktoren, in der Umsetzung von Fuzzy Ansätzen in der Düngeplanung sowie in der Umsetzung dieser im praktischen Pflanzenbau erlangt werden, welche eine weitere Erprobung und Präzisierung des Fuzzy Ansatzes als lohnend erscheinen lässt.

V. Literaturverzeichnis

1. Berntsen J., Thomsen A., Schelde K., Hanse O.M., Knudsen L., Broge N., Hougaard H., Hørfarter R. (2006) Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. *Precision Agriculture* 7, p. 65-83
2. Bouroubi Y., Tremblay N., Vigneault P., Bélec C., Panneton B., Guillaume S. (2011) Fuzzy Logic Approach for Spatially Variable Nitrogen Fertilization of Corn Based on Soil, Crop and Precipitation Information. In: Murgante B., Gervasi O., Iglesias A., Tanar D., Apduhan B.O. (eds) *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6782, p. 356-368
3. Fulton J.P., Shearer S.A., Higgins S.F., Darr M.J., Stombaugh T.S. (2005): Rate response assessment from various granular VRT applicators. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 48 (6) p.2095-2103
4. Gifford R.M. (1984): Energy in different agricultural systems: renewable and non-renewable sources. In: *Energy and Agriculture* (Hrsg. Stanhill G.), pp. 84-112. Springer-Verlag, Berlin
5. Kage H., Rathjen A. (2016): Düngeverordnung - Konsequenzen für den Weizen. *DLG-Mitteilungen* (11) 56-60
6. Kitchen, N. R., Drummond, S. T., Lund, E. D., Sudduth, K. A., & Buchleiter, G. W. (2003) Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal* 95, p. 483–495
7. Maidl, F. X., Huber, G., & Schächtl, J. (2004): Strategies for site specific nitrogen fertilisation in winter wheat. In *Proc. 7. Int. Conf. On Prec. Agriculture, Minnesota/USA*.
8. Prücklmaier, J. X. (2020): Feldexperimentelle Analysen zur Ertragsbildung und Stickstoffeffizienz bei organisch-mineralischer Düngung auf heterogenen Standorten und Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung durch computer- und sensorgestützte Düngesysteme. *Doctoral dissertation. Technische Universität München*
9. Ratjen, Arne M., (2012): Refined N-Fertilization of Winter Wheat: A model supported approach combining statistical and mechanistic components. *Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel*.
10. Reckleben Y., Schneider M., Wagner P., Schwarz J., Hüter J. (2007): Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung. *KTBL e.V., KTBL-Heft, 75*
11. Smil V. (1999): Nitrogen in crop production: An account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles* 13(2) 647-662
12. Schauer A., Rauch N., Marquering J., von Chappuis A. (2003): Europäische Norm für Mineraldüngerstreuer. *Landtechnik* 58 (2) 102-103
13. Schmidhalter, U. (2014): Sensorgestützte Ermittlung des Nährstoffbedarfs. *VDLUFA-Schriftenreihe 70, Kongressband 2014, p. 57-66, Hohenheim*.
14. Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T.L., Fixen P.E. (2009): Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133, 247-266

15. Tremblay N., Bouroubi Y., Panneton B., Guillaume S., Vigneault P., Be´lec C. (2010) Development and validation of fuzzy logic inference to determine optimum rates of N for corn on the basis of field and crop features. *Precision Agric* 11, p. 621–635
16. Zirps, N. & Gerwers, D. (2020): Aufbau eines Clusters zur Bereitstellung von aktuellen Fernerkundungsprodukten für die Landwirtschaft: Abschlussbericht der Hanse Agro Beratung und Entwicklung GmbH zum Verbundprojekt AGRO-DE : Laufzeit: 01.07.2016-30.06.2020. Hanse Agro Beratung und Entwicklung GmbH.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1763697150>