

Fuzzy Farmer – optimierte Stickstoffdüngung durch mehrparametrische Datenfusion und präzise Applikation in Echtzeit

Andreas Heiß¹, Dimitrios S. Paraforos¹, Galibjon M. Sharipov¹ und
Hans W. Griepentrog¹

Abstract: Zunehmende Umweltbedenken zwingen die Pflanzenproduktion dazu, die Effizienz der mineralischen Stickstoff (N)-Düngung zu steigern. Ein vielversprechender Ansatz ist hierbei eine kleinräumig angepasste N-Düngung, die mehrere für das Pflanzenwachstum relevante Parameter berücksichtigt. Ziel des Projektes ist es, ein auf der Fuzzy-Set-Theorie basierendes Expertensystem zu entwickeln, bei dem der Landwirt oder Pflanzenbauberater die relevanten Wirkzusammenhänge für eine konkrete Gabe definiert. Darauf basierend soll ein numerischer Algorithmus die Information aus einem Biomassesensor in Echtzeit mit weiteren kartierten Parametern verknüpfen, um die passende Dosiermenge auszugeben. Komplettiert wird der Ansatz durch die Entwicklung eines Gesamtmodells des Mineraldünger-Schleuderstreuers, das optimiert die Applikation sowohl in Querrichtung mit unterschiedlichen Dosiermengen der linken und rechten Teilbreite als auch räumlich und zeitlich dynamisch in Längsrichtung umsetzt. Erste Ergebnisse demonstrieren die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Fuzzy Expertensystems. Untersuchungen mit Hinzunahme von Bodeninformation zeigen die hohe Flexibilität des Konzeptes auf.

Keywords: Künstliche Intelligenz, Fuzzy Expertensysteme, Datenfusion, teilflächenspezifische Stickstoffdüngung, kleinräumige Heterogenität

1 Einleitung

Mittlere Verwertungsraten in der mineralischen Stickstoff (N)-Düngung liegen weltweit gesehen bei etwa 50 %. Dies führt zu erheblichen Treibhausgas-Emissionen sowie einer Verunreinigung von Luft und Trinkwasserressourcen [La14]. Umso wichtiger ist es deshalb, pflanzenbauliche und technische Potenziale auszuschöpfen. Probleme bei der Düngerapplikation stellen heute die Hauptparameter Dosiermenge, meist aus dem Pflanzenbedarf abgeleitet, und Verteilungsgüte des Düngers, meist technisch bedingt, dar. Angestrebt werden muss eine hohe Arbeitsqualität aus beiden Parametern.

Teilflächenspezifische N-Düngung ist ein vielversprechender Ansatz zur Vermeidung von N-Überschüssen [GK00]. Bei der Echtzeit-Applikation mit Biomasse-Sensoren wird in der Regel nur ein einziger Pflanzenparameter berücksichtigt, obwohl sich eine adäquate Dosiermenge auch in Kombination mit weiteren Faktoren ergibt. Es kommt daher häufig zu einer Fehldüngung, wenn etwa die konkrete Witterungssituation oder die variierende

¹ Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart, Korrespondenz:
andreas.heiss@uni-hohenheim.de

Bodengüte nicht berücksichtigt werden. Hersteller von Sensorsystemen bieten zum Teil eine Überlagerung mit beispielsweise einer Ertragspotenzialkarte an, was jedoch kein echtes Multiparametersystem mit numerischer Verknüpfung darstellt [Re07]. Auch in der Modellierung von Ackerbausystemen für Probleme der teilflächenspezifischen N-Düngung ist aufgrund der hohen Komplexität und Dynamik der Bedingungen im Freiland in naher Zukunft keine Praxisreife zu erwarten.

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Bestandsunterschiede in Weizen auf Distanzen unter 15 m und selten über 30 m zeigen können [Gr07]. Daraus wird deutlich, dass eine Teilschlagtechnik mit heute üblichen Arbeitsbreiten auch eine Variierung der Dosiermenge in Teilbreiten realisieren muss. Dies ist bei Zweiseiben-Schleuderstreuern bisher nur in begrenztem Umfang gegeben. Beim Einsatz von Echtzeit-Biomassesensoren ist außerdem die Änderung der Längsverteilung bisher noch nicht als dynamischer Steueralgorithmus realisiert. Auf dem Spot, auf dem der Nährstoffbedarf in Echtzeit sensorisch erfasst wird, wird daher häufig der entsprechende Dünger nicht platziert.

Ziel des Projektes „Fuzzy Farmer“ ist es, eine auf Expertenwissen basierende, kleinräumig angepasste N-Düngung zu realisieren. Eine Optimierung des Anbaumanagements soll zu wirksamen Minderungs- und Anpassungsoptionen führen, um damit negative klimaschädigende Effekte zu minimieren. Konkrete Arbeitsziele des Vorhabens sind:

- durch ein auf der Fuzzy Set Theorie basierendes System Expertenwissen zu nutzen, um eine mehrparametrische Datenfusion zur Ausgabe von kleinräumig angepassten N-Dosiermengen zu realisieren.
- durch die Entwicklung von Modellen des Sensor-Streuer-Systems die Applikation von Mineraldünger hinsichtlich Dosierung und Verteilung als Teilschlagtechnik wesentlich zu verbessern.
- durch eine automatisierte, durchgängig digitale Prozesskette den Aufwand für Düngeplanung und -dokumentation deutlich zu minimieren.

2 Material und Methoden

2.1 Aufbau des Gesamtsystems

Die Systemarchitektur ist in Abb. 1 dargestellt. Dabei sind ein Farm-Management-Informationssystem (FMIS) und ein Applikationssystem die beiden Hauptkomponenten. Entscheidungs- und Fusionsalgorithmus bilden zusammen ein Fuzzy Expertensystem. Im Entscheidungsalgorithmus werden durch einen Landwirt oder Berater Wirkzusammenhänge definiert. Fuzzy Logic ist gut an die Kognition des Menschen angepasst und berücksichtigt im Gegensatz zur booleschen Logik die Unschärfe von Information, welche bei natürlichen Prozessen auftritt. Im Fusionsalgorithmus werden die

Vorgaben des Experten genutzt, um die Daten aus dem Biomassesensor in Echtzeit mit weiteren Parametern zu fusionieren und Dosiermengen auszugeben.

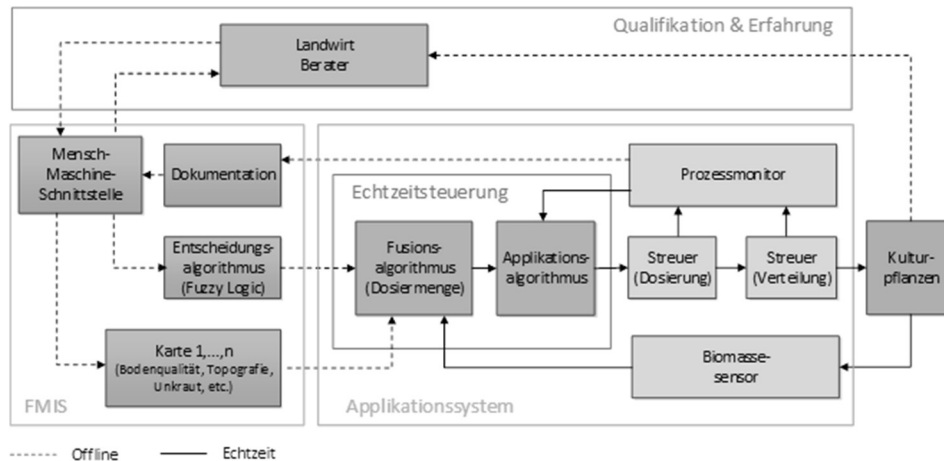


Abb. 1: Systemarchitektur

Die Applikation der Düngemittel in Echtzeit muss die Sollwertvorgaben genau und zuverlässig erfüllen. Hierbei sollen zumindest zwei Teilbreiten innerhalb des Applikationssystems umgesetzt werden. Um die präzise Düngung zu realisieren, soll ein neues, robustes, optimierungsbasiertes und echtzeitfähiges Regelungskonzept im Applikationsalgorithmus implementiert werden. Dieses soll eine Optimierung der zeitlich-räumlichen Versätze, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung, sicherstellen.

Im FMIS wird das Expertenwissen über eine benutzerfreundliche Webmaske erfasst und zusammen mit den erforderlichen Geodaten an das Applikationssystem weitergeleitet. Die Prozesskette verläuft von der Bestandesbonitur bis zur Dokumentation automatisiert und durchgehend digital. Durch die Rückkopplung von aufbereiteter Prozessinformation wird ein Wissenszuwachs generiert, der in die nächste Entscheidungsfindung einfließen kann.

2.2 Modellierung des Fuzzy Expertensystems

In Abb. 2 ist die Funktionsweise eines Takagi-Sugeno Fuzzy Inferenzsystems (FIS) schematisch dargestellt. Aufgrund von Prozesswissen werden Zugehörigkeitsfunktionen für Input und Output definiert und linguistischen Termen zugeordnet. In der Regelbasis legt der Experte die Zuordnung von Input zu Output fest. Bei der Fuzzifizierung werden aus scharfen (,Crisp‘) Input-Werten Zugehörigkeitsgrade ermittelt. In der Inferenz kommen Verfahren der Aussagenlogik zur Anwendung, um aus dem unscharfen (,Fuzzy‘) Input auf Grundlage der Regelbasis eine Implikation auf den Output umzusetzen. In der Regel sind mehrere Zugehörigkeitsfunktionen des Outputs betroffen, welche dann zum Endergebnis aggregiert und zu einem Crisp Output defuzzifiziert werden.

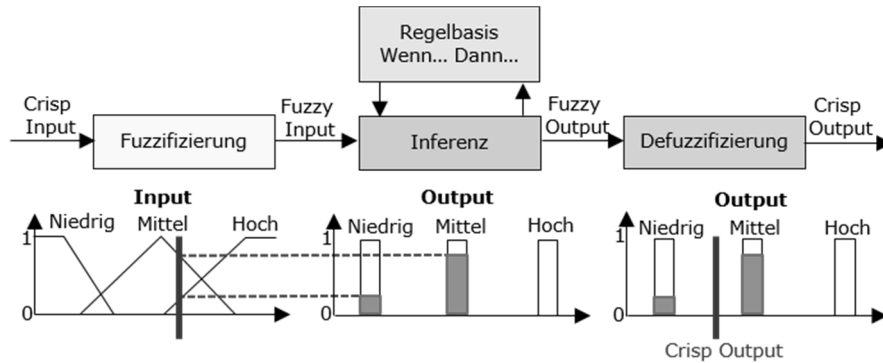


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Takagi-Sugeno Fuzzy Inferenzsystems

In 2019 wurden mit einem Yara N-Sensor ALS2 (Yara GmbH & Co. KG, Dülmen, Germany) zur zweiten (N2) und dritten (N3) N-Gabe Messungen in Winterweizen durchgeführt. Aus den georeferenzierten Aufzeichnungen wurden ein normalisierter Sensorwert (SN), welcher der N-Aufnahme des Bestandes in kg/ha entspricht, die N-Dosiermenge (DR_{YNS}) sowie die schlagspezifischen Kalibrierwerte genutzt. Mit der Software MATLAB R2019a (The Mathworks Inc., Natick, Massachusetts, USA) wurde ein Algorithmus entwickelt, der abhängig von den Kalibrierwerten ein Takagi-Sugeno FIS erstellt, welches die Düngealgorithmen des N-Sensors imitiert. Der Algorithmus wurde für einen Datensatz aus N2 optimiert und mit weiteren Daten aus N2 und N3 validiert.

Zum Fuzzy Logic-basierten N-Sensor Modell für N2 wurde die kartierte scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens (ECa) als weiterer Input aufgenommen. Es wurden zusätzliche Regeln mit halber Gewichtung definiert, die eine Zunahme der Dosiermenge mit zunehmender ECa implizieren. Dies fußte auf den Annahmen, dass auf den untersuchten Schlägen der Boden mit steigender ECa tendenziell schwerer wird und zu N2 eine ausreichende Wasserversorgung vorhanden war. Mit aufgezeichneten SN-Werten sowie ECa-Werten, welche von der Position der Messpunkte abgefragt wurden, wurde das Fuzzy Expertensystem simuliert.

3 Erste Ergebnisse und Diskussion

Die Charakteristik der generierten FIS kann mit Kennlinien und -feldern veranschaulicht werden. Abb. 3 (a) zeigt den Verlauf der Dosiermenge aus dem FIS (DR_{FIS}) abhängig von der Eingangsgröße SN für N2 im Feld Schafhauser Straße. Der Verlauf ober- und unterhalb des Biomasse-Schwellwertes (cutoff) entspricht grundsätzlich dem Verhalten des N-Sensors. Wie beim kommerziellen System wurde eine Limitierung der DR_{FIS} in einem Bereich von 0 bis 120 kg/ha implementiert, weil das System ab einem bestimmten SN-Wert negative DR_{FIS} ausgeben würde. Dies ist methodisch bedingt und dazu nötig, dass das FIS bei hohen SN-Werten nahe des Minimums noch zuverlässig funktioniert. In

Abb. 3 (b) ist die Charakteristik desselben FIS bei Hinzunahme der ECa dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Verlauf der DR_{FIS} abhängig von SN grundsätzlich erhalten bleibt, jedoch um die ECa als zusätzliche Dimension erweitert wird.

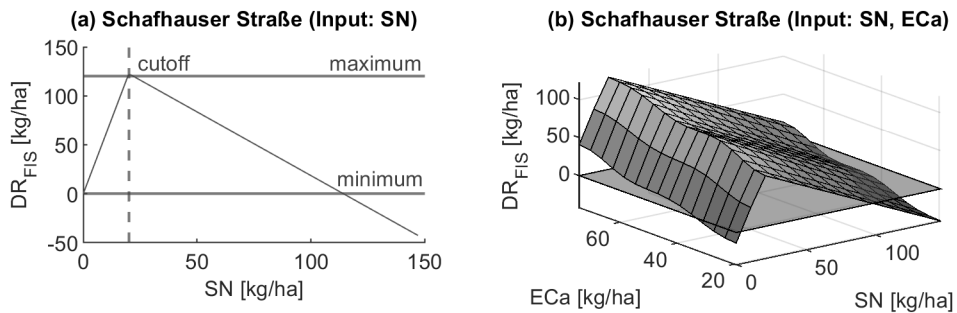


Abb. 3: Charakteristik der Fuzzy-Inferenzsysteme für Schafhauser Straße bei N2. SN-normalisierter Sensorwert, DR_{FIS} -Dosiermenge aus dem Fuzzy Inferenzsystem, ECa-scheinbare elektrische Leitfähigkeit

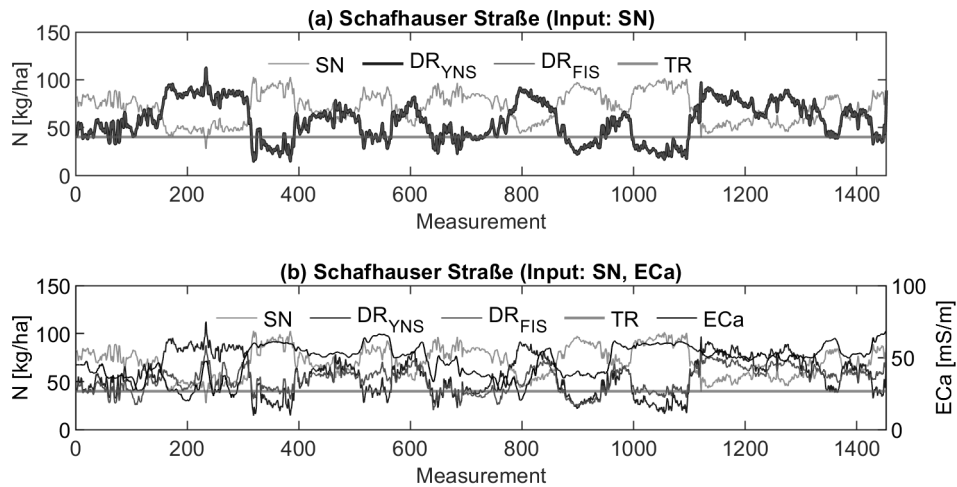


Abb. 4: Simulationsergebnisse für Schafhauser Straße bei N2. SN-normalisierter Sensorwert, DR_{YNS} -Dosiermenge aus dem N-Sensor System, DR_{FIS} -Dosiermenge aus dem Fuzzy Inferenzsystem, TR-Zielmenge, ECa-scheinbare elektrische Leitfähigkeit

In beiden Teilplots der Abb. 4 sind der chronologische Verlauf des SN-Wertes und der DR_{YNS} , sowie die Zielmenge für Schafhauser Straße bei N2 (TR) abgebildet. Dieser Datensatz wurde zur Validierung des entwickelten Algorithmus verwendet. Abb. 4 (a) zeigt den entsprechenden Verlauf der DR_{FIS} . Diese ist nahezu deckungsgleich zur DR_{YNS} , was auf eine gute Performanz hinsichtlich der Imitation des N-Sensors hindeutet. Für Abb. 4 (b) wurde bei der Berechnung der DR_{FIS} zusätzlich die ECa als weiterer Input berücksichtigt. Auch deren Verlauf ist dargestellt. In weiten Teilen verlaufen DR_{YNS} und

DR_{FIS} sehr ähnlich und weichen nur um wenige kg/ha voneinander ab. Jedoch sind auch bei einer halben Gewichtung der Eingangsgröße ECa noch starke Abweichungen möglich.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Es wurde ein Algorithmus entwickelt, der basierend auf feldspezifischen Kalibrierungen ein FIS erstellt, welches das Verhalten des kommerziellen Yara N-Sensor imitiert. Erste Validierungen zeigen die Anpassungsfähigkeit innerhalb gegebener Grenzen bezüglich des Einsatzzeitpunktes in Winterweizen. Durch die Hinzunahme der ECa als weiterer Eingangsgröße konnten die Standortverhältnisse in Simulationen berücksichtigt werden. Der entwickelte Algorithmus sollte in einem iterativen Prozess für weitere Einsatzszenarien angepasst werden. Durch Anpassungen der Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln könnte ein Experte die Vorgaben bei einer konkreten Gabe modifizieren. In Simulationen sollte eine Verknüpfung mit weiteren Eingangsparametern, wie beispielsweise der Topographie oder Bodenschätzdaten, erfolgen. Schließlich soll das mehrparametrische Fuzzy Expertensystem in Feldversuchen validiert werden.

Förderung

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung. Projektlaufzeit: 01.09.2018-31.10.2021. Projektpartner: Universität Hohenheim (Koordination Prof. Dr. Hans W. Griepentrog), TU Chemnitz, Hanse Agro GmbH, DISY Informationssysteme GmbH, YARA GmbH & Co. KG, RAUCH Landmaschinenfabrik GmbH.

Literaturverzeichnis

- [La14] Lassaletta, L. et al.: 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: The relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters* 9, 2014.
- [GK00] Griepentrog, H. W. and Kyhn, M.: Strategies for site specific fertilization in a highly productive agricultural region. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000. American Society of Agronomy, 2000.
- [Re07] Reckleben, Y. et al.: Teilflächenspezifische Stickstoffdüngung. *KTBL-Heft 75*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 2007.
- [Gr07] Griepentrog, H. W. et al.: A patch-size index to assess machinery to match soil and crop spatial variability. In: *Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, Skiathos, Greece, 3-6 June, 2007. Wageningen Press, Wageningen, The Netherlands, p. 407-413, 2007.