# Mehrjährige Erfahrungen mit der teilflächen-spezifischen Düngung und Ernte

**Edmund Isensee**[1)], **Eiko Thiessen**[1)] und **Peter Treue**[2)]
[1)] Christian-Albrechts-Universität, Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik, Kiel
[2)] Christian-Albrechts-Universität, Institut für Pflanzenzüchtung und Populationsgenetik, Kiel

*Die „teilflächenspezifische Bewirtschaftung" passt alle produktionstechnischen Maßnahmen den kleinräumig wechselnden Wachstumsbedingungen an. Also werden zunächst die Grundsätze und eigenen Wege dargestellt, die einzelnen Teilflächen zu kennzeichnen: nach der Struktur der Oberfläche oder nach der Beprobung und Bodenansprache. Die praktische Durchführung der spezifischen Produktionstechnik stellt Ansprüche an die Ausführung des Düngerstreuers sowie des Mähdreschers, namentlich an die Genauigkeit und Kontrolle der Ertragsmessung. Die eigenen Messungen unter den praxisgemäßen Verhältnissen ergänzen vorliegende Daten. Der Kern des Produktionssystems liegt darin, die N-Gabe präzise zu bestimmen. Dazu gibt es verschiedenartige Modelle und Vorgehensweise; den Berater oder den Reflexions-Sensor, der nach sachkundiger Kalibrierung die N-Gabe online steuert. Als Effekt ist ein etwas höherer Ertrag oder eine Einsparung an Dünger zu erwarten. Eine Übersicht zu den wichtigsten, langfristig vorliegenden Daten hinsichtlich Düngung und Ertrag ergibt kein eindeutiges Bild. Die Wirtschaftlichkeit beruht nach diesen Ergebnissen auf mehreren Effekten, die den Kosten gegenübergestellt werden.*

**Schlüsselwörter**
Teilflächenspezifische Bewirtschaftung, Bonitur von Böden, N-Sensor, Ertragsmessung, Wirtschaftlichkeit

## Begriff, Ziel und Erwartung

Die „teilflächenspezifische Bewirtschaftung" passt die produktionstechnischen Maßnahmen den kleinräumig wechselnden Wachstumsbedingungen an. Dieser Begriff beschreibt das Besondere in der Funktion, ohne sie mit einem bewertenden Attribut zu versehen, wie es in der Bezeichnung „precision farming" geschieht. Tatsächlich ist es offen, wie kleinräumig die Struktur und präzise die Wirtschaftsweise ist. Beide Gesichtspunkte sind in ihrer Ausprägung Gegenstand vielfältiger Forschungen und auch Inhalt des vorliegenden Beitrags, der allerdings diese Aspekte erweitert um die Effekte, die die spezifische Produktionstechnik im großtechnischen Rahmen erzielt.

Insofern wird die Definition von Treue [60]: „Teilflächenspezifische Pflanzenproduktion ist die Erfassung von Flächenanteilen mit unterschiedlichen, pflanzenbaulich relevanten Eigenschaften innerhalb einer landwirtschaftlich bewirtschafteten Fläche und die angepasste Bewirtschaftung der daraus resultierenden Teilflächen", ergänzt um das Ziel: Sie strebt mit entsprechend geeigneter Verfahrenstechnik eine höhere Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel sowie einen Zuwachs an Ertrag und Qualität an.

Das Produktionssystem umfasst die Bodenbearbeitung und Aussaat sowie Düngung und Pflanzenschutz, um mit spezifisch angepassten Maßnahmen den jeweils optimalen Ertrag mit geringem Einsatz an Mitteln zu erzielen. Unter den Maßnahmen erhält in den eigenen Arbeiten die N-Düngung die primäre Bedeutung.

Um diese Ziele zu erreichen, ist die Kenntnis des Bodens, seiner natürlichen Ertragsfähigkeit und die Kenntnis des Pflanzenbestandes, seiner potentiellen Ertragserwartung, nötig. Zur Beurteilung von Erfolg und Effizienz bietet der Mähdrescher das Messsystem für Ertrag, Feuchtigkeit und – neuerdings – Qualität an jeder Position auf dem Schlag. Die technische Voraussetzung liegt darin, die Position der einzelnen Teilflächen zu erfassen. Dafür steht der Begriff GPS (GPS = global positioning system) – gelegentlich das Kürzel für das gesamte pflanzenbaulich-technische System.

Zur Realisierung der komplexen Thematik wirkten unter der Projektleitung des Instituts für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik (Prof. Isensee und Griepentrog) die Institute für Pflanzenbau (Prof. Hanus, Dr. Schoop) und Bodenkunde (Prof. Lamp) sowie das Beratungsunternehmen Hanse agro zusammen, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Stiftung Schleswig-Holsteinische Landschaft, Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung.

### Ziel und Erwartung

Die spezifische Bewirtschaftung orientiert sich an dem Potential des Bodens mit all seinen, für das Wachstum der Pflanze relevanten Funktionen und dem Nährstoffbedarf der Pflanze. Dieser Zusammenhang sei für zwei unterschiedliche Böden anhand der N-Gabe veranschaulicht (**Bild 1**).

Der gute Boden erbringt das Ertragsoptimum bei einem Düngeniveau, das für den schlechteren bereits den Abfall der Ertragskurve bedeuten kann. Daraus folgt: die teilflächenspezifische Düngung würde das geringere Potential mit weniger Nährstoff versorgen, also Dünger sparen. Wenn die konstante Düngung wegen des Risikos von Minderertrag oder Lager insgesamt reduziert wird, bleibt auf guten Teilflächen Ertragspotential ungenutzt. Also liegt hier der Ansatz zum Mehrertrag.

Aus der aus Literatur sind mögliche Effekte der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zu nennen (vgl. Kap. „Daten der Literatur" und „Düngung und Erträge von Schlägen und Teilflächen"):

- Einsparung an Stickstoff von 30-60 kgN/ha bei annähernd gleichem Ertrag
- Ertragssteigerung um 1-3 dt/ha
- Erhöhung des Ertrages bei erhöhter N-Gabe.

Die Effekte aus eigenen Untersuchungen werden im Kap. „Ergebnisse zur teilflächenspezifischen Düngung" vorgestellt.

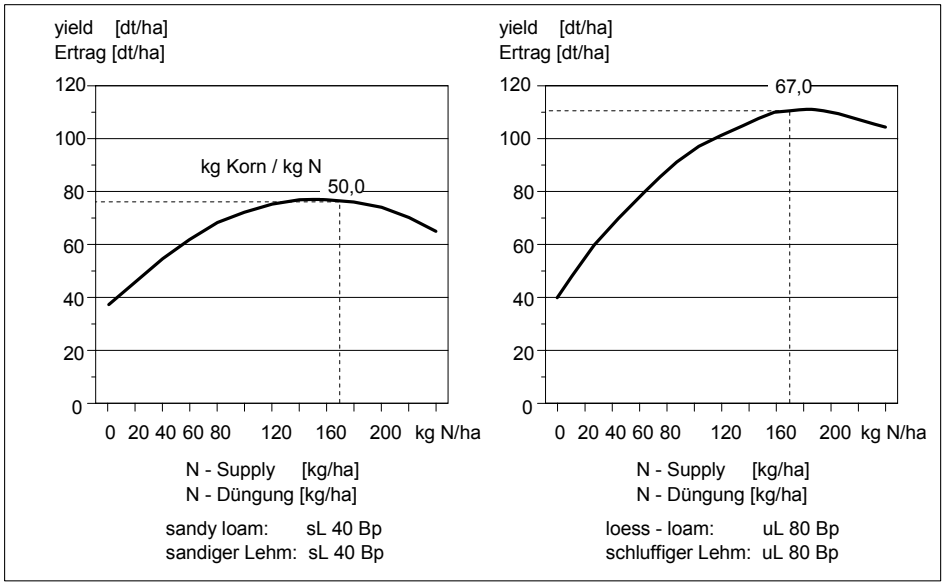



Bild 1: Wirkung der N-Düngung auf unterschiedlichen Böden [Nprog nach Schoop, 51, 52]

Die am Ertrag orientierte Düngung sollte als ökologischen Vorteil eine ausgeglichene N-Bilanz erbringen. Diese Bilanz lässt sich aber nur dann korrekt errechnen, wenn auch der korrespondierende spezifische Proteingehalt eingeht [18]. Tatsächlich variiert er nach online-Messungen des Instituts [34] in weitem Bereich; der Zusammenhang mit der Heterogenität des Schlages ist noch zu analysieren.

Weitere Möglichkeiten liegen in der angepassten Bodenbearbeitung und Aussaat mit dem ähnlichen Ziel: ein Zuviel zu vermeiden und ein mögliches Potential auszuschöpfen. Hier liegen Ansätze von Voßhenrich [61] vor, der mit der von einer Bodenkarte gesteuerten Bearbeitungstiefe Einsparungen an Kraftstoff erzielt. Die Anpassung der Aussaat wird erst bei hohen Saatgutkosten relevant. Auf Grund des hohen Kompensationsvermögens wirkt sich eine Änderung um 10-20 % kaum in der Zahl ährentragender Halme oder im Ertrag aus [63].

Im Pflanzenschutz besteht die Möglichkeit, den Mittelaufwand zu reduzieren, wenn zwischen den messbaren Unterschieden im Bestand eine klare Korrelation zu Art oder Dosis der Bekämpfung besteht [6, 8, 10, 11]. Das trifft für Unkrautnester zu, wenn sie über eine GPS-gespeicherte Applikationskarte zu behandeln sind oder für Bestände, in denen die Dichte, beziehungsweise die Masse des Bestandes auf das Risiko von Pilzbefall deutet. Dann kann die Einsparung 20 €/ha erreichen – stets abhängig vom jeweiligen Flächenanteil im Schlag.

Die eigenen Arbeiten stellen die Definition von Teilflächen, Technik und Strategie der spezifischen N-Düngung sowie den Effekt auf Ertrag und Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt.

## Definition von Teilflächen

Die spezifische Produktionstechnik setzt voraus, dass die unterschiedlich ausgeprägten Teilflächen definiert sind und zwar nach

- der langfristigen Ertragsfähigkeit des Bodens
- der aktuellen Ertragserwartung des Pflanzenbestandes.

Die wesentlichen Merkmale dazu stellt **Bild 2** dar.

| Karten zu: | | Herkunft |
|---|---|---|
| Schlaggrenzen | | GPS - Vermessung |
| Relief | | |
| – Hang | | |
| – Senke | | Kataster digitalisieren |
| – Kuppe | | Landesvermessungsämter |
| Bodenart | | |
| zahl | | |
| " | | Reichsbodenschätzung |
| | *einmalig* | |
| | *Änderung über Jahre* | |
| Grundwasser | | |
| Humusgehalt | | |
| pH-Wert | | |
| Nährstoffe | | |
| Ertrag Vorjahre | | Bodenproben |
| Luftbilder | | " sondierung |
| | | "monitoring" |
| | Kenntnisse des Landwirts | |

Bild 2: Datengrundlage zur langfristigen Ertragsfähigkeit

Als erstes aussagefähiges Merkmal hat Griepentrog [20, 21] angesichts des Standorts im Hügelland Schleswig-Holsteins das Relief gewählt. Dazu liegen im Landesvermessungsamt Karten vor; es lässt sich aber auch nach dem eigenen Augenschein einfach und sicher das Relief bestimmen.

Untersuchungen zeigen, dass das Relief mit dem Ertrag bzw. der Ertragsfähigkeit einer Teilfläche korreliert [23, 24, 37, 45]. Hier spielt v.a. die Wasserversorgung eine Rolle. Sickerwasserbewegungen und die damit verbundenen Stofftransporte verlaufen in ebenen Lagen meist vertikal. In Hanglagen tritt dagegen auch eine laterale, hangparallele Wasserbewegung auf. Daher sind Kuppen in Hügel- und Berglandschaften in stärkerem Maße durch Trockenheit und Stoffabfuhr gekennzeichnet als die Böden in Senken und Tälern, die durch Zuschusswasser, Ansammlung von Grundwasser und Zuwanderung von gelösten Nährstoffen beeinflusst werden.

Oberhänge und Kuppen weisen abgetragene und damit verjüngte Böden auf, während sich in den Senken das erodierte Bodenmaterial ansammelt. Außerdem hat die Exposition der Hanglagen durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung und damit unterschiedlichen Bodentemperaturen einen erheblichen Einfluss auf die Ertragsfähigkeit.

Neben der großen Einteilung der Teilflächen in die Kategorien Ebene (EB), Hang (HA), Kuppe (KU) und Senke (SE) können mit der Exposition der Hänge, dem Sandanteil auf den Kuppen und dem ungefähren Humusgehalt in den Senken weitere Charakteristika zur Beschreibung der Teilflächen herangezogen werden.

Der Boden bildet somit die eine Basis für die Düngung, namentlich die erste N-Gabe. Zur Veranschaulichung dient das Höhenpotential über eine Fahrgassenlänge (**Bild 3**) mit Höhendifferenzen zwischen 11 und 21 m. Die definierten Abschnitte sind 30 bis 100 m lang. Die beispielhaft eingetragenen N-Gaben beruhen außerdem auf der vorliegenden Bodenart. In der Bemessung der Düngung sind vor allem die Senke und die Kuppe hervorzuheben.

Zu Bodenart und –typ liegen die Daten der Reichsbodenschätzung vor, ursprünglich gewonnen aus Grablöchern im Abstand von 50 m; deren Rohdaten lagern bei den oberen Finanzbehörden. Die daraus abgeleiteten Bodenzahlen bilden ein weites Raster im ha-Maßstab, das der tatsächlichen Heterogenität im m² - Maßstab nicht gerecht wird. Das belegen vielfältige Beobachtungen sowie Arbeiten im Rahmen von teilflächenspezifischer Bewirtschaftung.

Die Bodenheterogenität lässt sich am Pflanzenbestand durch Messwerte verdeutlichen, die ein Reflexions-Sensor liefert. Das Maß für die geringste Länge einer Teilfläche wird durch eine geostatistische Analyse über ein Semivariogramm

verallgemeinernd formuliert [58] (**Bild 4**).

Ein Beispiel für solch eine Analyse gibt-Bild 4. Für mehrere Versuchsflächen ist dies getan. Auf den heterogenen Standorten des Hügellandes liegen die minimalen Teilflächenlängen bei 25 m, auf der Geest um 31 m und auf Fehmarn, dem als homogen angesehenen Standort, bei 79 m. Zu diesen Maßen passt die Arbeitsbreite von Düngerstreuern.

Das Beispiel eines Versuchsschlages von 30 ha aus dem eigenen Projekt stellt das Ausgangsbild der Reichsbodenschätzung der Karte gegenüber, die Hackbarth und Treue [27, 31, 60] nach differenzierter Beprobung und Bodenansprache erstellt haben (**Bild 5**). Die Teilflächen haben begrenzte Ausmaße, nach etwa 30 m ändert sich die Ertragsfähigkeit. Die Verknüpfung von verfügbaren Bodenzahlen mit der 1 m tiefen Bohrung bringt präzise Angaben. Der Aufwand aber ist sehr hoch. Daher sieht es Lamp [39, 40] als zweckmäßiger an, gezielt an aussagefähigen „Monitorzellen“ Bonituren anzustreben, die repräsentativ für die Teilflächen des Schlages sind.

Alternativ zur Beprobung des Bodens steht die Bonitur des Pflanzen-Bestandes. Sie ist messtechnisch einfacher zu realisieren, kennzeichnet aber unterschiedliche Wirkungen, u.a. die Bodenunterschiede. Das kann während der Vegetation geschehen oder in Verbindung mit der Ernte als Ertragskarte. Diese Karte ist dank zuverlässig gewordener Messsysteme recht einfach zu erhalten. Sie bildet von Jahr zu Jahr zunehmend eine gut interpretierbare Aussage.

Derartige Auswirkungen sind an den teilflächenspezifischen Daten zu erkennen. Die Applikations- und vor allem Ertragskarte stellen deutlich die Hoch- und Niedrig-Ertragszonen dar, die sich im Laufe der Jahre bestätigen, wenn die Einflüsse von Fruchtart und Witterung in fachlicher Analyse – nicht allein statistischer Korrelation - berücksichtigt werden [3, 48].

Eine weitere Information bietet die Fernerkundung über das Reflexionsspektrum der Oberfläche oder der Vegetation [56, 60]. Die Fläche kann zu verschiedenen Terminen aufgenommen werden, die gezielte Bearbeitung des Reflexionsspektrums präzisiert die Aussagefähigkeit.

Rote Farbtöne des Bodens kurz nach der Saat werden durch Verlehmung/Tonung hervorgerufen, also der Neubildung von Tonmineralien aus sandigem Verwitterungsmaterial. Helle gelbliche Flecken deuten auf Quarzsand, grüne treten in den geschützten Senkenbereichen auf, in denen Wintergetreide bereits aufgelaufen ist. Die tief dunkle Färbung dokumentiert hier anmoorige Bereiche. [60].

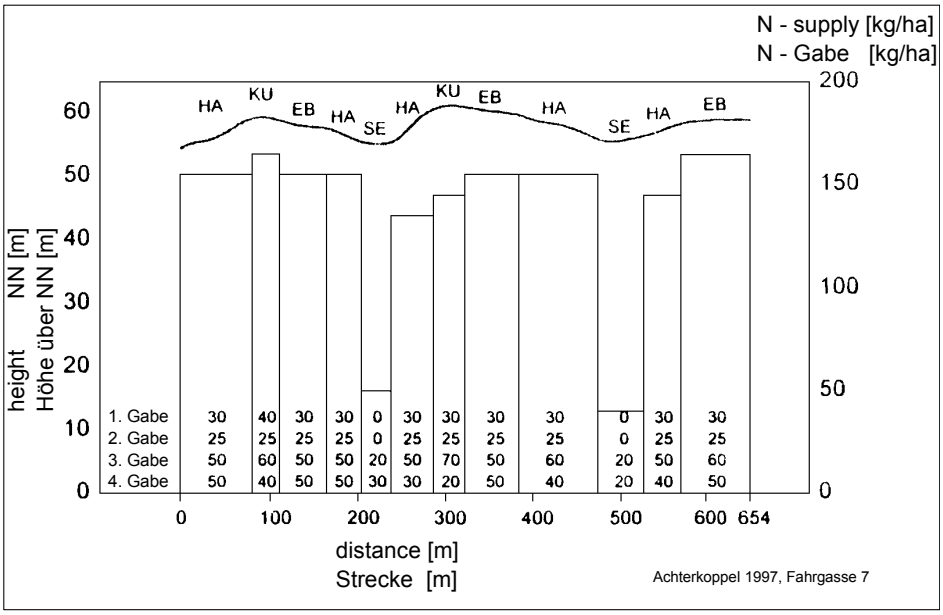



Bild 3: Relief und Stickstoffgaben einer Fahrgasse

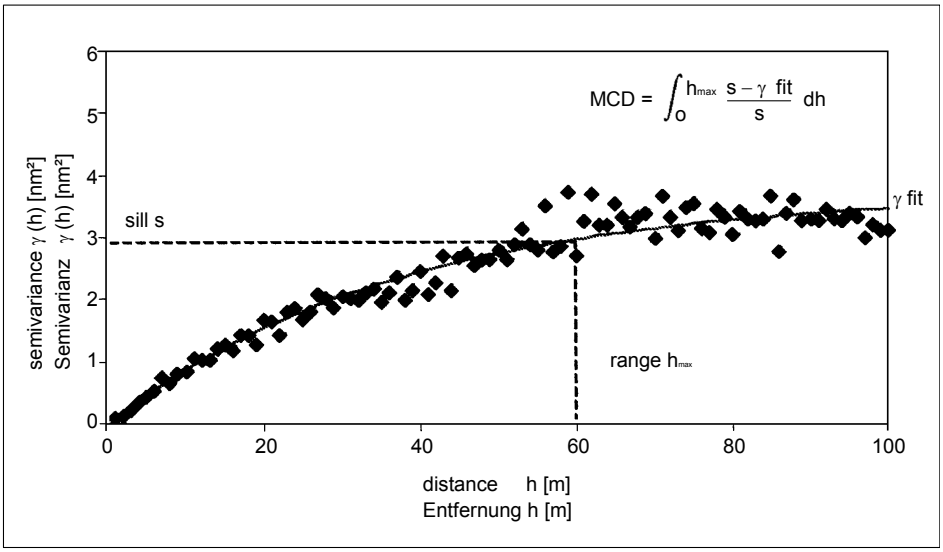



Bild 4: Semivariogramm zur Kennzeichnung der Variabilität (58)




Bild 5: Ursprüngliche und überarbeitete Bodenkarte auf Grund von Beprobung und Ertragskarten

## Technik für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung

Die spezifische Verfahrenstechnik benötigt zum einen ein System, das die Lage der Fläche und die Position der Arbeitsmaschine erfasst und zum anderen Steuerungs- und Messsysteme an der Maschine, die die Düngergabe steuern und den Ertrag registrieren.

Die räumliche Erfassung von Schlepper und Fläche geschieht über die Signale mehrerer Satelliten und einer gut definierten Referenzstation (vgl. **Bild 6**). Damit wird aus dem „globalen Positionierungssystem“ GPS das differentielle, abgekürzt DGPS. Als Referenz sind der Küstenfunk oder Radiosignale sowie – unabhängig von der Region – geostationäre Satelliten eingeführt. Die Systeme haben ihre Bewährungsprobe bestanden, sie werden von einigen international tätigen Herstellern auch komplett mit der Maschine, zumeist dem Mähdrescher angeboten. Die Genauigkeit reicht für die übliche Anwendung mit einem Messfehler bis 3 m aus. Zur Überprüfung vergleicht man die aufgezeichneten Messpunkte mit der real durch Arbeitsweise oder Fahrgassen vorgegebene Route.

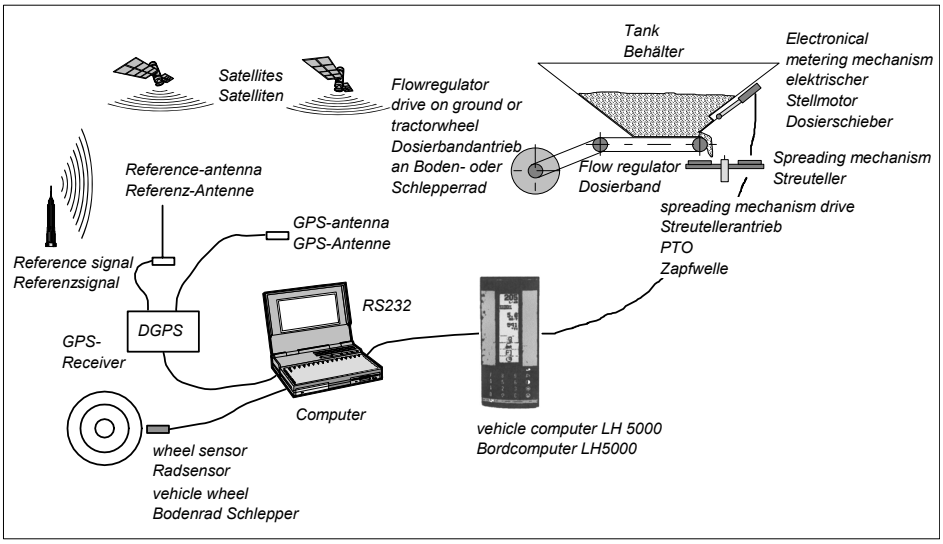



Bild 6: Teilflächenspezifische Düngung – Ortungssystem und Steuerungstechnik

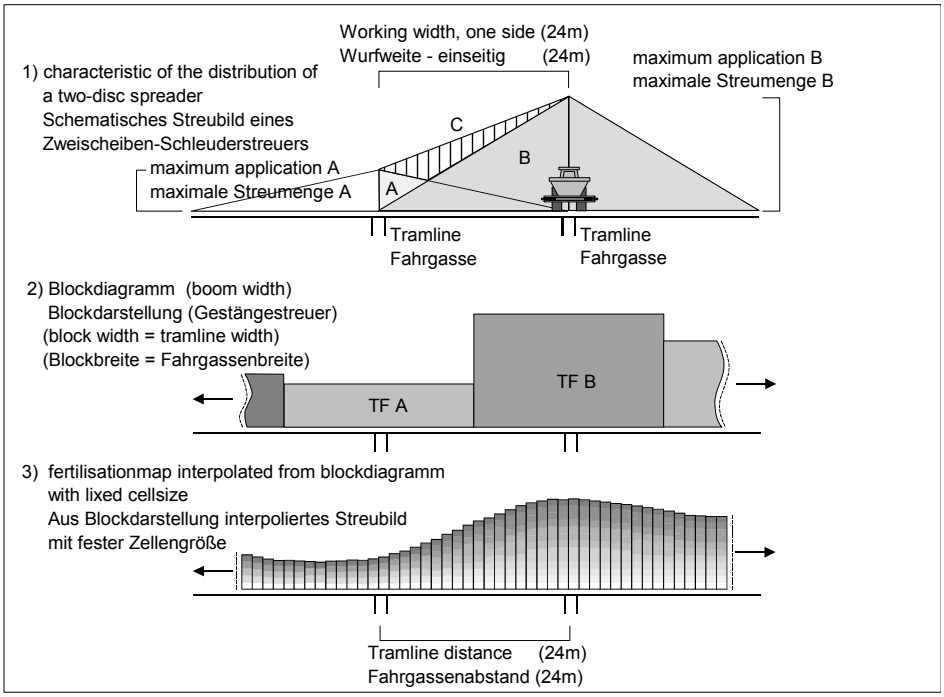



Bild 7: Schema des Streubildes eines Schleuderstreuers und die interpolierte Applikationskarte [60]

### Technik des Düngerstreuers

Als Streuprinzip hat sich der Schleuderstreuer bewährt, weil das abfallende Streubild zu gleitenden Übergängen in der Quer- und Längsverteilung führt, wenn die N-Gabe geändert wird [Griepentrog, 22]. Die Rechteck-Verteilung eines Gestängestreuers hingegen führt zu starker Abstufung der Düngergabe. Dieser Streuer hätte allerdings unter versuchstechnischem Aspekt Vorteile, da N-Gabe und Teilfläche klar zugeordnet werden können; beim Schleuderstreuer hingegen sind die Mengen benachbarter Teilflächen zu interpolieren (vgl. **Bild 7**).

Zur Düngung besteht zum einen die Möglichkeit, eine interpolierte Menge aus mehreren umliegenden Rasterfeldern zu applizieren. Also wird vom Bordrechner in einem Radius, der vorwählbar ist, in Quer- und Längsrichtung über umliegende Rasterfelder angeglichen. Durch diese Interpolation weicht die Applikations-Sollvorgabe von der tatsächlichen Menge ab. Allerdings besteht die Möglichkeit, eine Applikationskarte während des Düngens auf PCMCIA-Karte zu schreiben.

Die Dosierung erfolgt in den eigenen Versuchen über einen Schieber, den ein vom Jobrechner gesteuerter E-Motor verstellt, damit also den Querschnitt für den Gutstrom, also die Streumenge, verändert. In der Regel läuft der Dünger per Schwerkraft – abhängig von seiner Fließfähigkeit – auf die Streuscheibe. Von Vorteil aber wäre, die Dosierung von der Fahrgeschwindigkeit abhängig zu machen: über Reibrad am Schlepper oder besser über ein Bodenrad (vgl. Bild 6), wie in den eigenen Versuchen geschehen. So kann die Geschwindigkeit an Hindernissen oder am Vorgewende verringert bzw. dort, wo es möglich ist, erhöht werden, ohne dass sich dadurch die Ausbringungsmenge pro Hektar verändert.

Die Längs- und Querverteilung darf nicht vom Durchsatz abhängig sein. Denn mit wechselnder Gabe, z.B. 20 bis 100 kg N/ha und wechselnder Geschwindigkeit, z.B. 5 bis 15 km/h, variiert der Durchsatz im Verhältnis von 1:15. Daten dazu liefert die DLG-Prüfung, nach der bei neuen, guten Maschinen der VK als Beurteilungsmaßstab mit 4-7 % auf gutem Niveau bleibt [25, 30, 46].

Zur Längsrichtung kommt es weiterhin darauf an, wie lang die Reaktionszeit und damit die Strecke ist, die der Stellmotor für die Umsetzung der neuen Sollmenge braucht. Im eigens angelegten Versuch wurden die Reaktion und das Streubild gemessen [31, 47]. An vorgegebener Grenzlinie (**Bild 8**) wurde die Soll-Menge von 0 auf 150 kg/ha KAS erhöht bzw. erniedrigt und die gestreute Menge in den bekannten Prüf- Schalen von 0,5 x 0,5 m aufgefangen. Der Vorgang zwischen den Extremen verläuft hier über eine Strecke

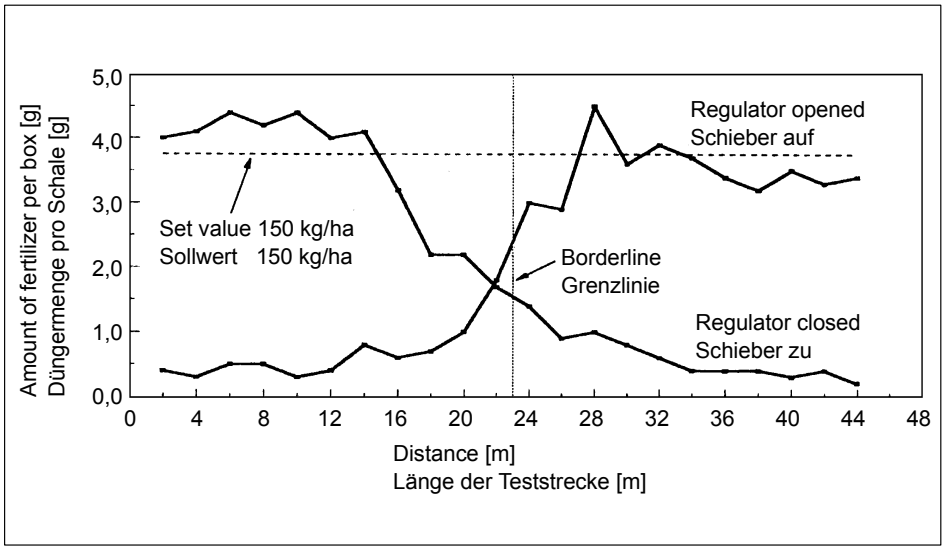



Bild 8: Längsverteilung von Dünger beim Öffnen und Schließen des Schiebers (Bredal B. 2, 9, 6 km/h)

von 15 m, abhängig von der Geschwindigkeit des Schleppers und des Stellantriebes. Je nach Fabrikat liegt dessen Laufzeit zwischen 3 und 12 s.

Bild 8 weist auf einen weiteren Aspekt hin, nämlich den Abstand zwischen der Grenzlinie, auf der der Streuer geschaltet wird und der Reaktion im Streubild. Im System gilt dies für den Abstand zwischen dem GPS-Empfänger auf dem Schlepperdach und dem 12-20 m weit nach hinten geworfenen Dünger, abhängig von Düngerart und Einstellung der Streuer. Diese Differenz wird vom Hersteller aus den einzelnen, spezifischen Faktoren berechnet, zu denen die Bandgeschwindigkeit, der Abstand zur Streuscheibe und die Fahrgeschwindigkeit gehören.

Die eigenen Versuche wurden im Fahrgassen-System mit 24 m (selten 18 m) Arbeitsbreite durchgeführt. Über die Schlaglänge von etwa 800 m wurde die N-Gabe bei Hin- und Rückfahrt spezifisch dosiert. Damit entstand ein Schlag von etwa 3 ha als Variante.

**Technik der Ertragsmessung**

Den Ertrag und damit den Erfolg der Anbautechnik zu messen, ist ein stetes Ziel der Agrartechnik [35]. Seit Jahrzehnten laufen die Entwicklungen, den Körner-Durchsatz im Mähdrescher zu erfassen [2]. Sie sind – nicht zuletzt im Kontext zur Teilflächen-Bewirtschaftung – erweitert auf die Hackfrüchte sowie den Futterbau während der Mahd [32, 34].

Für das Messsystem des Mähdreschers sind mehrere Elemente von Bedeutung.

Der Messwert im Mähdrescher soll der Position zugeordnet werden, an der die Pflanzen gewachsen sind. Dafür steht das GPS-Signal. Es hat dank des Referenzsignals eine hohe Genauigkeit (1 bis 3 m) und Ausfallsicherheit erreicht [64]. Dazu spielen zwei Größen eine Rolle:

- der Ort, an dem die GPS-Antenne installiert ist, also in der Regel das Kabinendach
- die Wegstrecke, bzw. die Zeit, die das Korn vom Schneidwerk bis zum Durchsatz-Messgerät benötigt.

Dafür ist die Geschwindigkeit bedeutsam, mit der das Korn die einzelnen Funktionsgruppen des Mähdrescher durchläuft [5]. Das Schneidwerk führt während der Fahrt das Getreide von beiden Seiten zur Mitte, so dass ein gleitender Mittelwert über Arbeitsbreite und Fahrstrecke entsteht. Außerdem nimmt das Korn nicht den direkten Weg zum Körnerelevator sondern muss über die Siebreinigung. Ein geringerer Anteil wird erst im Schüttler abgeschieden und von dort zurück auf die Reinigung geschickt.

Insgesamt führt also die Dynamik des Druschprozesses zu einer Verzerrung. Die Verzögerung geht vom Werk aus für das jeweilige Modell bzw. Druschsystem in das Messsystem ein. Der Praktiker kann sich davon ein Bild machen, indem er während des Drusches spezifisch erkennbares Getreide in den Einzug schüttet und die Zeit feststellt, zu der dieses Gut im Korntank ankommt, und zwar vom ersten bis letzten Korn.

In der Maschine wird der Durchsatz gemessen, der Ertrag jedoch wird aus mehreren Größen errechnet. Den zurückgelegten Weg zu erfassen, ist relativ einfach. Berührungslos misst der Radarsensor den Weg oder der Induktivgeber im nicht angetriebenen Rad. Diese Systeme sind bewährt und seit Jahren an Maschinen installiert. Alternativ kann das GPS-Signal genutzt werden.

Der Fahrereinfluss variiert, da jeder Fahrer unterschiedliche Abstände zur Bestandeskante hält. Daraus folgt, dass die tatsächliche Arbeitsbreite nicht mit der effektiven Arbeitsbreite übereinstimmen muss. Als Praxiserfahrung gilt, dass 30-40 cm., also 5 % der Schneidwerksbreite ungenutzt bleiben. So dieser Wert konstant bleibt, kann die reale Arbeitsbreite in das System eingegeben werden. Bei kleineren Schlägen, kupiertem Gelände sowie weniger versierten Fahrern geht die Abweichung – wechselnd – über 50 cm hinaus. Damit wird bereits ein Messfehler von 5-10 % des Ertrages verursacht.

Die derzeitige Software ermöglicht es daher dem Fahrer, während der Arbeit die tatsächliche Arbeitsbreite zu korrigieren.

Sinnvoller wäre natürlich, die tatsächliche Breite messtechnisch zu erfassen und in das Ertragsmesssystem einzugeben. Dazu bestehen bereits seit den 70'er Jahren Bemühungen, ein automatisches Lenksystem einzuführen: ob mit mechanischem Taster oder berührungslos mit Radar, Ultraschall oder Bildauswertung. Inzwischen bietet Fa. Claas mit dem „Laser-Piloten" ein System an, das offenbar funktioniert und den Mähdrescher automatisch an der Bestandskante entlang führt. Eine weitere innovative Lösung nutzt das GPS zur Parallelfahrt. Damit wäre die volle Schneidwerkskapazität stets ausgelastet.

In welchem Maße die Abweichungen auftreten, ist aus den eigenen Versuchen dargestellt [33]. Innerhalb des Schneidwerks waren Sensoren montiert, die während des Druschs den Abstand zum Bestand registrierten. Ein derartiges Messsystem wäre auch als Zusatz generell am GPS-Mähdrescher denkbar.

Für den Korndurchsatz stehen unterschiedliche Messprinzipien von einzelnen Anbietern zur Verfügung [9, 23]: Die volumetrische Messung beruht auf der Füllung eines Zellenrades oder der Paddel im Elevator. Die Schütthöhe auf den Förderelementen wird mit Hilfe einer Lichtschranke gemessen. Aus dem Wechsel von Hell-/Dunkelphase wird das Volumen über eine Kalibrierfunktion errechnet. Paddel und Innenmaß des Elevators müssen also dauerhaft exakt aufeinander abgestimmt sein. Die potentiellen Störgrößen, z.B. Hangneigung, werden vom Neigungssensor erfasst und in der Kalibrierung berücksichtigt.

Das gemessene Volumen wird zur Masse über das Hektolitergewicht umgerechnet. Dies jedoch muss stets und sorgfältig überprüft werden, da es mit der Getreide-

sorte und den Druschbedingungen, also teilflächenspezifisch, schwanken kann.

Das Kraft-Impuls-System beruht darauf, dass der Gutstrom mit bekannter Geschwindigkeit auf eine Prallplatte trifft, die sich auf einen Kraftsensor stützt. Form und Größe sowie Wurfbahn sind theoretisch und empirisch belegt. Unter ungünstigen Bedingungen, z.B. bei Grünbesatz oder zum Kleben neigendem Raps, kann sich erfahrungsgemäß Material an der Platte festsetzen und damit die Messung verfälschen.

Der Anspruch an die Genauigkeit des Messsystems ist sehr hoch, soll es doch Ertragsdifferenzen von wenigen dt/ha belegen. Der Messfehler sollte also unter 5 % liegen, und zwar insgesamt, also mit den Einzelkomponenten Schnittbreite und Durchsatz.

Der zweite Anspruch liegt in der Bezugsfläche. Nicht der Schlag oder die Korntank- oder Kipperfüllung gilt als Vergleich, sondern die Menge einer Teilfläche. Sie mag 30 m lang sein, aber nur so breit wie das Schneidwerk, also beispielsweise 6 m. Damit beträgt die Teilmenge nur 150 bis 200 kg, die genau zu messen ist. Mit Blick auf die spätere Kartierung mag eine Abweichung gedämpft werden, da die Daten von z.B. fünf Mähdrescherbreiten zu einem Wert zusammengefasst werden.

Zur Genauigkeit liegen von Auernhammer Untersuchungen vor, bei denen die firmenspezifischen Messsysteme im Prüfstand zusammengebaut waren [38]. Sie zeigen insgesamt geringe Abweichungen bezogen auf die Masse je Korntank. Es fehlen aber Aussagen zum dynamischen Verhalten der Systeme, wenn nämlich der Durchsatz kurzzeitig variiert, und es fehlen Angaben dazu, wie genau der Ertrag von Teilflächen erfasst wird. Das direkt zu prüfen scheint schwierig. Ein interessanter Weg dazu besteht darin, den Mähdrescher so einzusetzen, dass seine Schnittbreite in unterschiedlichem Maß ausgenutzt wird – dementsprechend also der Messwert steigen oder fallen muss. Ein stufenartig präparierter Getreidebestand lässt zugleich die Reaktion bzw. Verzögerung im System erkennen.

Im eigenen Versuch wurden die Alternativen, also das Prinzip nach Volumen oder Masse im gleichen Mähdrescher eingebaut. Und sie sollten die gleichen Erträge an gleicher Stelle angeben. Damit bleiben die Einflussgrößen Durchsatz, Schnitt-Breite, Korn und Druschqualität gleich.

Um den Einfluss verschiedener Teilflächen aufzuzeigen und bewerten zu können, orientierte sich die Auswahl der Flächen an deren Heterogenität. Ebenso war eine Variation der Erträge ein Kriterium für die Auswahl der Flächen. Der Durchsatz wurde variiert, indem die Geschwindigkeit in drei unterschiedlichen Stufen verändert wurde. Am Ende jeder Mähdruschgasse wurde abgetankt. Der von System ermittelte und der gewogene Wert wurden notiert. Unter den gegebenen Versuchsbedingungen lag der mittlere Durchsatz zwischen 13 und 24 t/h . Die geringere Geschwindigkeit wurde gewählt, um den Messbereich zu erkennen.

Da beide Systeme parallel arbeiten, sollten sie auch das Gleiche aufzeichnen. Allerdings müssen die unterschiedlichen Abspeicherungsintervalle berücksichtigt werden.

Zunächst werden einige Ergebnisse zur Kontrollwiegung des Bunkerinhalts wiedergegeben. Die im Mähdrescher angezeigten Gewichte wurden aufgeschrieben und später mit dem ermittelten Gewicht der Waage verglichen. Dafür gibt **Bild 9** nach der Kalibrierung ein gutes Bespiel. Die mittlere Abweichung liegt bei 2,3 %, die maximale um 4 %. Damit liegt die Abweichung unter dem angestrebten Sollwert von 5 %, aber immerhin für Massen von jeweils 5 bis 8 t. Für eine Kalibrierung bedeutet die Spannweite der Einzelwerte, dass mehrere Kontrollwiegungen nötig sind, außerdem Sorgfalt beim vollständigen Entleeren. Das dynamische Verhalten beider Messsysteme wird online auf dem Feld erfasst und grafisch über die Schlaglänge dargestellt.

Im Beispiel nach **Bild 10** ähneln sich die Kurven weitgehend. Aber während der Kraftsensor recht gleichmäßig 11 t/ha anzeigt, springen die Werte aus der Volumen-Messung zwischen 12 und 13 t/ha. Die Senke im Ertrag geben beide Systeme im gleichen Maße wieder. In einem anderen Beispiel [29] fällt der System-Unterschied auf. Der Mähdrescher hat viel Grünbesatz zu verarbeiten. Also steigt der Messwert für Volumen aber nicht für die Masse.

## Bemessen der Stickstoffgabe

Die einzelnen Teilflächen eines Schlages sind durch eine unterschiedliche naturgegebene Ertragsfähigkeit definiert. Die Bodenuntersuchung liefert nähere Informationen über den verfügbaren Gehalt an Nährstoffen.

Die N-Düngung setzt auf die zum Zeitpunkt der Applikation eingeschätzte, realisierbare Ertragserwartung für Boden und Bestand, die ihrerseits von vielfältigen Faktoren abhängt. Diese Vielfalt besteht aus Faktoren, die untereinander in funktionaler Beziehung stehen. Allerdings sind nur einige Faktoren überhaupt bzw. mit vertretbarem Aufwand messbar. Andere Einflüsse beruhen auf Folgen wechselnder Witterung, sind also nur begrenzt zu prognostizieren.

Daraus erwachsen mehrere Grundprinzipien, um die N-Gabe zu definieren (**Bild 11**). Die einfache Grundlage beruht auf Erfahrungs- und Richtwerten, die für Sorte und Standort gelten und je nach optischen Eindruck des Bestandes und je nach Wetterlage modifiziert werden. Dazu gehört auch der Entzug an Nährstoff, den die anstehende Ernte oder die Vorfrucht vom Acker abführt. Zur Konkretisierung dieses Ansatzes liefert die teilflächenspezifische Ertragserfassung eine Grundlage. Über den Ertrag wird dann ei-

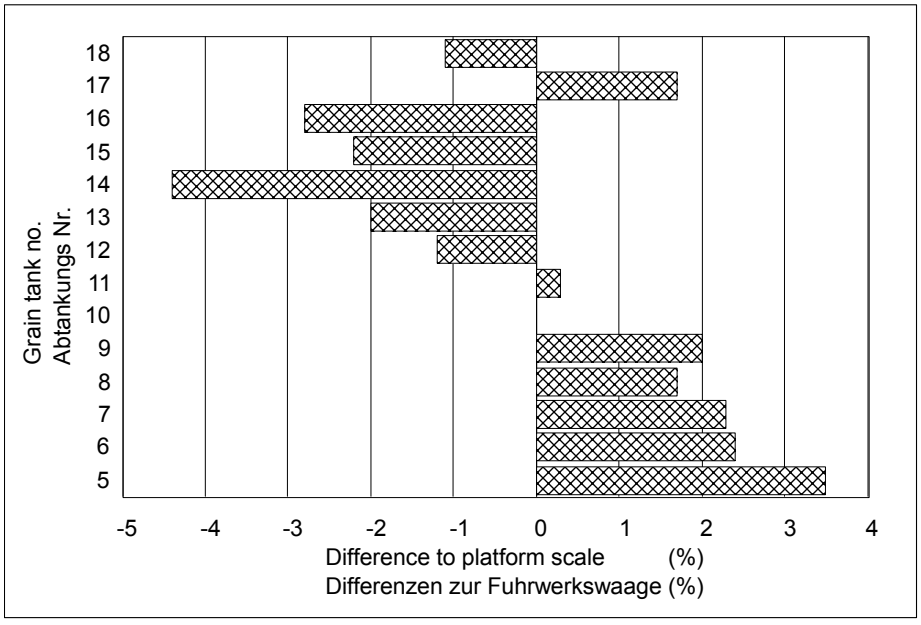



Bild 9: Gemessene Masse im Korntank und Abweichung zur Fuhrwerkswaage

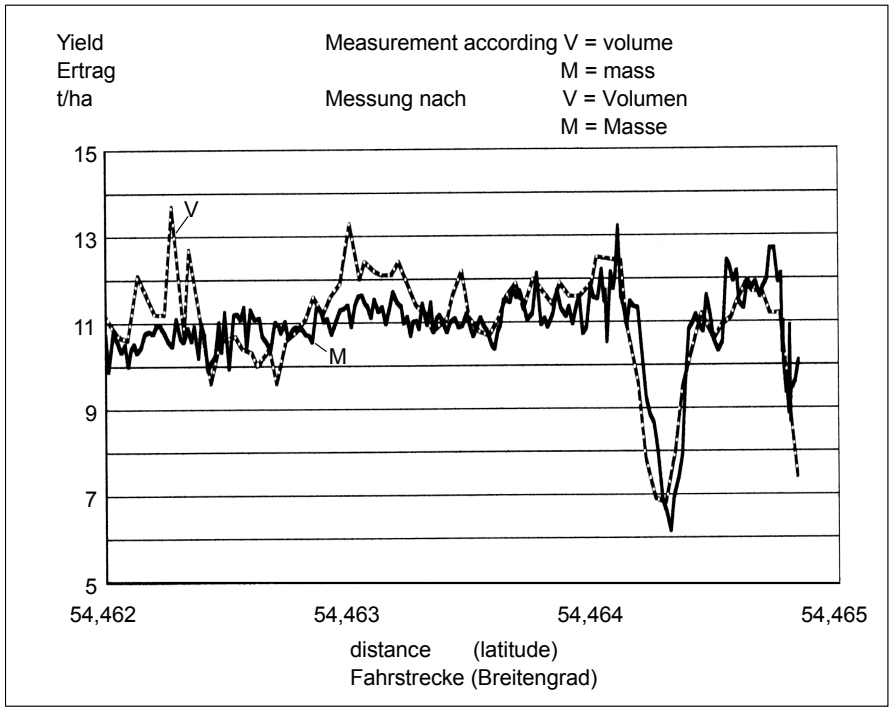



Bild 10: Durchsatzmenge im Verlauf der Schlaglänge

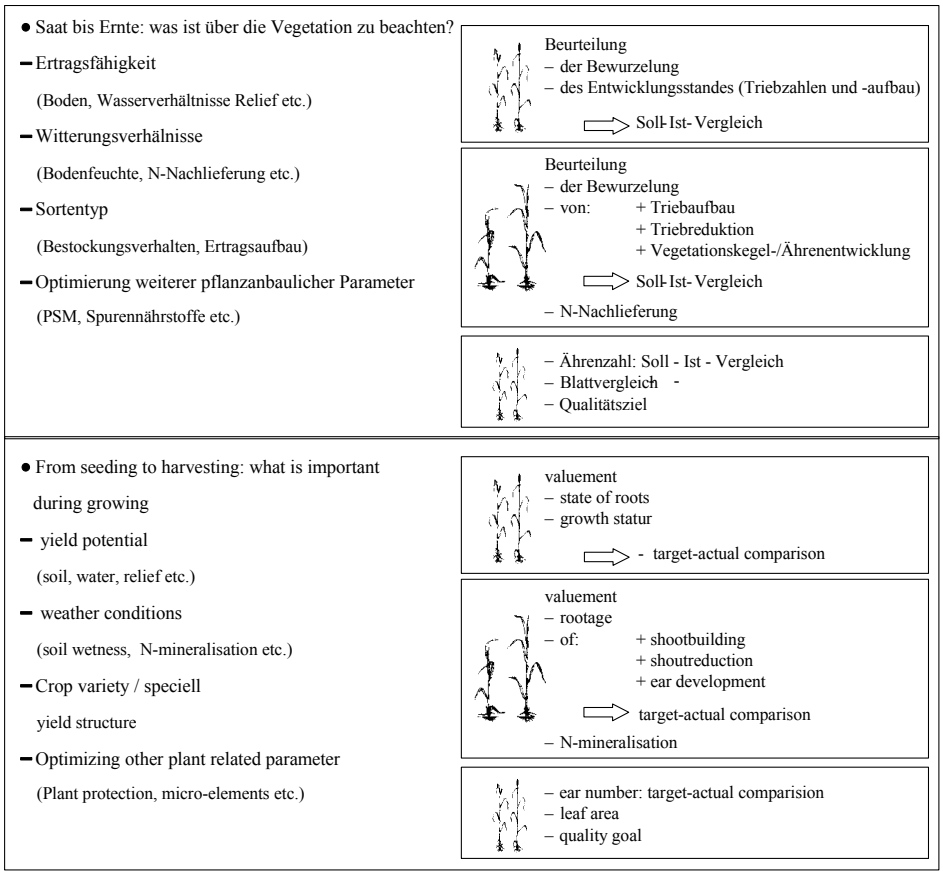



Bild 11: Entscheidungsgrundlage zur N-Gabe nach Hanse-Agro [31]

ne Flurkarte mit dem teilflächenbezogenen Entzug an Nährstoffen erstellt. Diese Flurkarte kann dann später der Steuerung des Düngegerätes per GPS dienen. Es eignet sich im wesentlichen nur für Nährstoffe wie z.B. Phosphor und Kali, bei denen zwischen der Vorfruchternte und dem Düngungstermin keine Auswaschung oder Mineralisation das Ergebnis verändert. Werden allerdings über mehrere Jahre Ertragskarten ausgewertet, so können auch für die Stickstoffdüngung Hoch- und Niedrigertragszonen berücksichtigt werden.

Die Analytik bringt mehr Information, einmal als mineralisierten Stickstoff ($N_{min.}$) im verfügbaren Bodenvorrat, der 2.000 bis 15.000 kgN/ha betragen kann aber nur zu wenigen % mineralisiert wird. Zum andern erbringt die Pflanzenanalyse eine Aussage zum aktuellen Ernährungsstatus.

Die N-min-Methode [62] als Bodenuntersuchung bedeutet, dass der mineralische Stickstoff (Ist-Wert) in verschiedenen Bodenschichten analytisch ermittelt und die Stickstoffgabe einfach aus der Differenz zum erwünschten Stickstoffangebot (Soll-Wert) errechnet werden. Es können Ab- oder Aufschläge auf die errechnete Stickstoffgabe erfolgen, je nachdem, ob z.B. durch Vorfruchternterückstände eine erhöhte Mineralisierung bei feuchtwarmer Witterung zu erwarten ist oder nicht. Für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung sind sehr viele Bodenproben notwendig. Diese Methode liefert aber zugleich Hinweise zur ökologisch relevanten Thematik von N-Bilanz und Auswaschung.

Die Bodenanalyse zeigt das Angebot an Nährstoffen, die Pflanzenanalyse den Versorgungsstatus. Bei dieser Methode werden einzelne Pflanzen auf ihre Nitratkonzentration hin untersucht. Dabei gibt es zum einen chemisch analytische Methoden (Nitratschnelltest), oder optische Methoden (SPAD bzw. N-Tester) [1, 65, 66]. Bei ersteren Verfahren wird direkt die Nitratkonzentration in den Pflanzenstengeln ermittelt, während letztere Methode über den Umweg der Chlorophyllkonzentration der Blätter auf den Stickstoffbedarf schließt. Diese Methodik erbringt schnell eine Aussage, ist auch in den eigenen Versuchen mit berücksichtigt worden.

Alternativ zu diesen analytisch geprägten Methoden stehen mathematische Modelle, die das Wachstum unter dem Einwirken verschiedenartiger Umweltbedingungen, hier namentlich des Stickstoff, formulieren [4, 13, 36, 54].

Die empirisch ausgerichteten Modelle beruhen auf historischen Daten, also langjährig geführten Statistiken, in die vor allem die Wetterdaten eingehen, differenziert für Sorten und Böden. Damit beschreiben die Modelle langfristig gültige Zusammenhänge, nicht die aktuelle Situation auf dem einzelnen Teilschlag. Als Beispiel dafür ist das in Kiel von Hanus und Schoop entwickelte Nprog in das eigene Vorhaben aufgenommen (51-55) worden.

Prozessorientierte Modelle nehmen Wachstum bestimmende Parameter während der Vegetation auf, z.B. Feuchtigkeit

oder Temperatur oder sie simulieren die Mineralisierung des organischen Stickstoffs, um daraus den Bedarf der Pflanzen zu konkretisieren. In Verbindung mit Geoinformationssystemen (GIS) sind einige Modelle im Rahmen des „preagro"-Projekts (63) eingesetzt. Dort bietet sich die Chance, die üblicherweise vorliegenden Kenngrößen durch weitere Projektdaten zu ergänzen. Dabei mangelt es insbesondere an hochaufgelösten Daten zu den Teilflächen, um Ertragserwartung und N-Gabe hinreichend genau anzugeben.

Bei der Feldbonitur (z.B. durch den Pflanzenbauberater oder Landwirt) sind die aktuelle Bestandssituation und physiologische Entwicklung der Pflanzen wesentlich präziser zu berücksichtigen. Die aufgeführten Zusammenhänge kennt der Praktiker prinzipiell, jedoch nicht in ihrem quantitativen Ausmaß. Er kennt – mehr oder minder genau – das Verhalten der Sorte, den Verlauf der Witterung und ihren Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit im Boden. Ein Berater kann die Bedeutung einzelner Einflussfaktoren aus der großen Zahl beobachteter Flächen seiner Klienten einschätzen. Daher ist diese Methode – als Relief-Variante bezeichnet – im eigenen Projekt realisiert.

Aus seiner Erfahrung und den aktuellen Erkenntnissen heraus analysiert er den Status der Pflanzen auf den Teilflächen und ordnet ihnen die N-Gabe zu (vgl. Bild 11). Er geht von den Faktoren aus, die von der Saat an den Bestand auf den Teilflächen beeinflusst haben. Zu Beginn der Vegetation kommt es darauf an, über eine ausreichende Anzahl an Trieben das Ziel ährentragender Halme zu erreichen. So der gewünschte Status nicht erreicht ist, erhält beispielsweise der schlecht entwickelte Bestand auf der Kuppe 20 kg N/ha mehr, die Senke hingegen angesichts des N-Potentials weniger.

Die N2-Gabe wird den Anteil schwacher und starker Triebe beachten sowie Aufbau und Entwicklung der Ähren. Die letzte Gabe oder der zweite Teil von N2 wird verstärkt dem Qualitätsziel dienen. Protein-Einlagerung hängt wesentlich davon ab, inwieweit der Stickstoff allein für das Wachstum verbraucht ist. Im allgemeinen wird der gut, kräftig grün aussehende Bestand zurückhaltend gedüngt. Alternativ dazu wird stark gedüngt, um das hohe Ertragspotential auszuschöpfen und außerdem hohe Qualität zu erreichen (Qualitätskalibrierung).

Also verbindet die Feldbonitur die theoretischen Erkenntnisse mit der jeweils vorliegenden Realität. Damit kommt es gedanklich dem „map overlay" entgegen. Es ist also eine hohe Prognose-Sicherheit zu erwarten. Daher hat in den eigenen Versuchen der Berater mitgewirkt. Es entsteht ein hoher Zeitaufwand dadurch, dass er die einzelnen Teilflächen begehen muss. (siehe Kap. „Investition und Kosten").

Die oben beschriebenen Methoden müssen vor der eigentlichen Düngung durchgeführt werden. Die daraus gewonnenen Soll-Werte für die Teilflächen sind zu einer Applikationskarte aufzubereiten. Der direkte zeitliche Bezug fehlt. Diese Verfahren bezeichnet man als „mapping approach". Der Arbeitsaufwand ist bei den Pflanzen- bzw. Bodenbeprobungen für die benötigte hohe Ortsauflösung sehr hoch.

Daraus resultieren die Bestrebungen, den Status von Boden und Pflanze während der Fahrt zu erfassen und danach die Nährstoffgabe zu steuern.

An Bemühungen um eine online Bodenuntersuchung hat es nicht gefehlt [1, 44, 57]. Der Einsatz ionenselektiver Elektroden – die während der Verteilung von Dünger mit fortlaufend erstellten wässrigen Bodenauszügen beaufschlagt werden – zielt in diese Richtung. Das gleiche gilt für Verfahren, bei denen der Nährstoffgehalt des Bodens mittels der reflektierten Strahlung im nahen Infrarot-Bereich ermittelt werden. Eine Einsatzreife dieser Verfahren ist bislang nicht abzusehen.

Für die online Untersuchungen der Pflanzen gibt es mittlerweile einige interessante Ansätze. Dazu zählen neben den optischen (Reflexion und Fluoreszenz) auch die mechanische Methode (Pendelsensor) und Radarmessung. Zielgröße bei der mechanischen Methode [11, 12] ist die Bestandesdichte. Gemessen wird die Auslenkung eines Pendels, welches am Traktor montiert ist, bei der Fahrt. Einflussgröße ist hier sicherlich neben der Bestandesdichte die Halmfestigkeit. Bei der Radarmessung soll der Feuchtigkeitsgehalt in dem untersuchten Volumen ermittelt werden. Über eine Laufzeitermittlung ist auch die Bestandeshöhe feststellbar. Letzteres Verfahren ist noch im Entwicklungsstadium.

Praktische Bedeutung hat die Reflexion, da zwischen dem Messwert und der Stickstoffversorgung eine sichere, lineare Beziehung besteht, die online zur Bemessung der N-Gabe verwendet werden kann („Kieler System", [28, 49, 50]. Daher wird das Messsystem von der Industrie kurz als „N-Sensor" bezeichnet [65].

In der Praxis kennzeichnet der Sensorwert den Status der Pflanze, der nicht nur von der N-Gabe, sondern auch von Bodeneigenschaften beeinflusst ist. Die Kalibrierung von Messwert und Sollgabe wird nach Niveau, Unter- und Obergrenze der Düngung nach dem Wissen des Landwirts vorgenommen.

Angesichts der kontinuierlichen Messung und der guten Möglichkeit, die N-Gabe nach variierten Merkmalen zu kalibrieren, ist der Sensor in eigenen Versuchen genutzt worden.

Damit sind in den folgenden Untersuchungen mehrere Strategien, den Acker teilflächenspezifisch zu düngen, im Vergleich mit der betriebsüblichen eingesetzt. Die Ungewissheiten, die N-Gabe richtig zu bemessen, führte dazu, in einzelnen Varianten die Gabe um etwa 20 % zu erhöhen und zu senken. Auf den einzelnen Schlägen sind die Varianten in unterschiedlicher Weise realisiert, also werden sie gemeinsam mit den Ergebnissen behandelt.

## Ergebnisse zur teilflächenspezifischen Düngung

Die präzise Kenntnis all der Eigenschaften eines Schlages erlaubt Konsequenzen in der gesamten Anbautechnik. Der Schwerpunkt liegt naturgemäß im Effekt auf Düngung und Ertrag.

### Daten der Literatur

Dazu findet man in der Literatur unterschiedliche Angaben, wie sie beispielhaft in der **Tabelle 1** aufgeführt sind. In der Tendenz findet man die beiden Effekte: etwas mehr Ertrag oder weniger Dünger. Zur Interpretation müsste man das betriebsübliche Ertragsniveau und die Intensität in der Produktionstechnik kennen, außerdem die Heterogenität der Flächen, also den Anteil besonders schlechter oder guter Teile.

### Düngung und Erträge von Schlägen und Teilflächen

Die eigenen Versuche liegen in führenden Ackerbaubetrieben. Der Überblick über mehrere Jahre stellt Teilflächen-Varianten der im Betrieb üblichen Düngung gegenüber, in der nicht konstant sondern angepasst an extreme Teilflächen, z.B. Senken, gedüngt wird (**Tabelle 2**). Die Varianten beruhen auf der Berater-Empfehlung (Relief), dem Modell Nprog sowie der Reflexionsmessung, teilweise erhöht und reduziert.

Die Erträge und N-Gaben sind als Mittelwert eines Schlages mit den verschiedenen Teilflächen dargestellt. In einzelnen fällt auf:

Tabelle 1: Aussagen verschiedener Autoren zum Effekt teilflächenspezifischer Bewirtschaftung

| Autor | Mehrertrag | zusätzliche Effekte |
|---|---|---|
| Jürschik 1999 | 1-3 dt/ha | weniger N |
| Wollring et al. 1999 | Ø 1,8 dt/ha | weniger Lager, gleichmäßigere Abreife nach Proteingehalten |
| Wollring und Reusch 1999 | bis 4,2 dt/ha in 12 von 14 Versuchen | weniger $N_{min.}$ Im Herbst, homogenere Entwicklung, weniger Infektionsdruck |
| Dampney et al. 1999 | keine signifikante Differenz | weniger N-Austrag |
| Ostergaard 1997 | 30-40 €/ha | einschl. Einsparungen |
| Reetz/Fixen | 35 €/ha | einschl. Einsparungen |
| Schmerler/Jürschnik 1997 | Bis 3,9 dt | 25 kg/ha Einsparung, |
| Leithold 2002 | Bis 3,4 % aus 55 Großversuchen | gleichmäßigerer Bestand, im Mittel 15 % höhere Mähdrescher-Leistung |
| Norsk Hydro 1999 | Ø 2,13 % aus 96 internationalen Versuchen, 1,28 dt/ha aus 18 Versuchen in Deutschland | 0,1 % Protein bei gleicher N-Menge |

- gleicher oder sogar höherer Ertrag bei reduzierter N-Gabe
- gleiche N-Gabe und unterschiedliche Erträge
- erhöhte N-Gabe und geringerer Ertrag.

Dieses Gesamt-Ergebnis lässt keine klare Richtung erkennen und keine Präferenz für eine N-Strategie. Eine Ursache mag darin liegen, dass die jeweilige Teilflächen unterschiedlichen Anteil an der Schlaglänge haben. Eine weitere mag in der Streuung der Erträge auf einer Teilfläche mit etwa 5 dt/ha liegen.

Mit Blick auf die N-Gabe und die Ertragswirkung sind weitere Auswertungen relevant. Diese sind dadurch möglich, dass die N-Gabe variiert ist und gleiche Teilflächen mehrfach auf dem Schlag vertreten sind.

So deutet die erhöhte N-Gabe für Gerste in 1998 auf generell zu geringe Nährstoffgabe. Das lässt sich veranschaulichen, wenn alle Erträge über die N-Gabe abgetragen werden, in **Bild 12** differenziert nach Boden. Der lS 39 setzt mit geringer N-Gabe ein, hier bedingt durch eine anmoorige Senke. Er erreicht früher sein Optimum als die beiden anderen Böden und wird im Ertrag abfallen, wenn die guten Teilflächen angemessen hoch gedüngt werden. Die Streuung der Werte könnte mit der Exposition erklärt werden. Die Sonne wärmt und trocknet den Südhang, so dass die Gerste zügiger wächst.

Diese Grafiken belegen, dass im Grunde für jede Teilfläche die Produktionsfunktion vorliegen müsste. Und da stellt sich die Frage, ob und in welchem Maße sich die Teilflächen in ihrer Ertragsfähigkeit überhaupt unterscheiden. Eine Antwort bieten die Daten in **Tabelle 3** für Ertrag und N-Gabe der einzelnen Relief-Flächen, hier ausgewertet als Mittel über alle eingesetzten N-Strategien (60). Insgesamt differiert der Durchschnittsertrag nur um wenige dt/ha, die Kuppe fällt eher ab, die Senke wechselt stark je nach Realisierung des natürlichen N-Vorrats.

In den einzelnen derart definierten Teilflächen wechselt der Boden und damit die Ertragsfähigkeit. Eine weitergehende Differenzierung haben daher Hackbarth [15, 16, 27] über die Beprobung und Treue [60] über die Auswertung von Luftbildern und Ertragskarten vorgenommen.

## Gesamtvergleich von Düngung und Ertrag

Im Laufe der Jahre hat sich eine beachtliche Fülle an Daten zu Düngung und Ertrag ergeben. Die Analyse einzelner Elemente des Produktionssystems deutet auf recht große Streuung in Maßnahmen und Effekt. Daher sollen nunmehr die verfügbaren Daten zu Düngung und Ertrag von all den Feldern mit den 49 Versuchsteilschlägen zusammengestellt werden, die vom Institut teilflächenspezifisch und betriebsüblich bewirtschaftet wurden. Die Darstellung umfasst die Jahre 1996 bis 2002, mehrere Schläge je Jahr und vielfältige Variationen zur Festlegung der N-Gabe. Da sie alle dem gleichen Ziel, eine hohe Nährstoff-Effizienz zu erreichen, dienten, werden sie in eine Grafik aufgenommen, dort aber gesondert markiert.

Im Sinne einer Vergleichbarkeit werden Erträge und N-Mengen als Relativzahl zu den entsprechenden Betriebsdaten (=100%) ausgedrückt und in ein Diagramm aufgenommen (**Bild 13**).

Aus der Lage lässt sich jeweils ablesen, ob eine Variante im Vergleich zum Betrieb einen höheren oder niedrigen Ertrag erreichte bzw. mehr oder weniger Dünger einsetzte.

Allgemein lässt sich der Darstellung entnehmen, dass meistens die Düngestrategien mit weniger Stickstoff als der Betrieb ähnliche Erträge erzielten. Die Sensorvarianten erreichten höhere Ertragsabweichungen vom Betrieb als die Reliefvarianten – sowohl nach oben als auch nach unten. Bei allen drei Varianten kam es auch

Tabelle 2: Düngevarianten und Erträge

| | 1997 | | 2000 | | 1998 | | 2001 | | 2002 | | 1999 | | 2001 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Achterkoppel | | | | | | | | | | Niedeel | | | |
| | Winter-Weizen | | | | Winter-Gerste | | | | Raps | | Winter-Gerste | | Winter-Weizen | |
| N-Variante | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha | N kg/ha | Ertrag dt/ha |
| betriebsüblich | 196 | 110 | 237 | 97 | 161 | 83 | 159 | 88 | 116 | 37 | 171 | 98 | 226 | 113 |
| reliefspezifisch | 164 | 105 | 191 | 92 | 129 | 83 | | | | | 169 | 95 | | |
| reliefreduziert | 131 | 107 | | | 97 | 85 | | | | | 153 | 87 | | |
| Relief erhöht | | | | | 152 | 90,3 | | | | | | | | |
| N-Prog | | | 230 | 101 | | | | | | | 174 | 90 | | |
| Sensor | | | | | | | 148 | 81 | 115 | 36 | | | 209 | 114 |
| Sensor reduziert | | | | | | | 145 | 84 | 93 | 35 | | | 176 | 109 |
| Sensor erhöht | | | | | | | 161 | 78 | | | | | 258 | 110 |
| Sensor $N_3$Qualität | | | | | | | | | 115 | 32 | | | 195 | 113 |

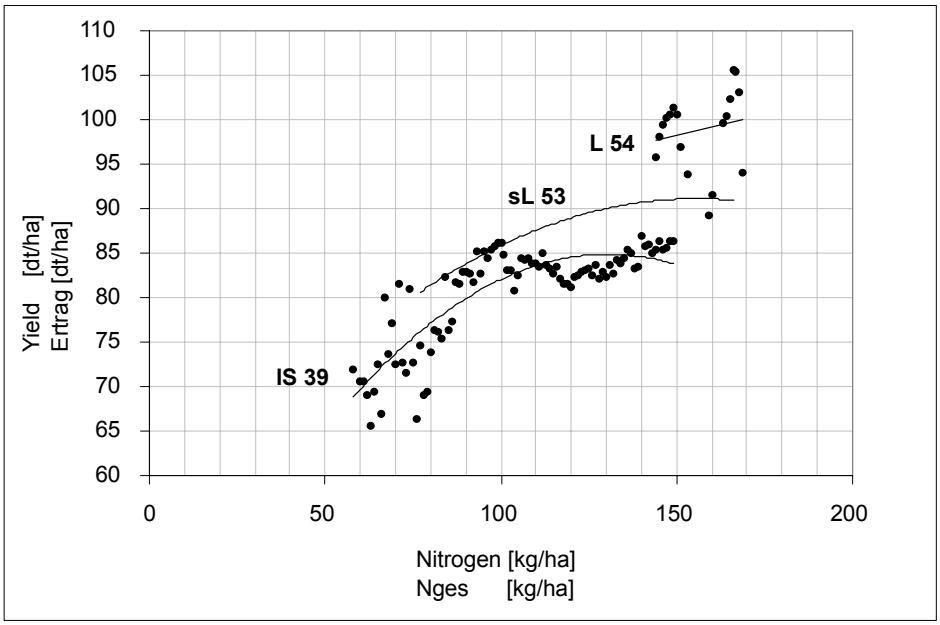



Bild 12: Ertragsfunktionen auf unterschiedlichen Teilflächen, Wintergerste 1998

Tabelle 3: Ertrag der Relief-bedingten Teilflächen als Mittel und Spannweite der 6 N-Varianten auf der Achterkoppel [60]

| | Winter-Weizen 1997 | | Winter-Gerste 1998 | | Winter-Raps 1998 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Relief** | **Ertrag t/ha** | **Spannweite dt/ha** | **Ertrag dt/ha** | **Spannweite dt/ha** | **Ertrag dt/ha.** | **Spannweite ht/ha** |
| Ebene | 88 | 8 | 107 | 4 | 43 | 27 |
| Hang | 88 | 7 | 106 | 6 | 42 | 37 |
| Kuppe | 84 | 6 | 101 | 11 | 41 | 24 |
| Senke | 84 | 12 | 107 | 4 | 40 | 29 |

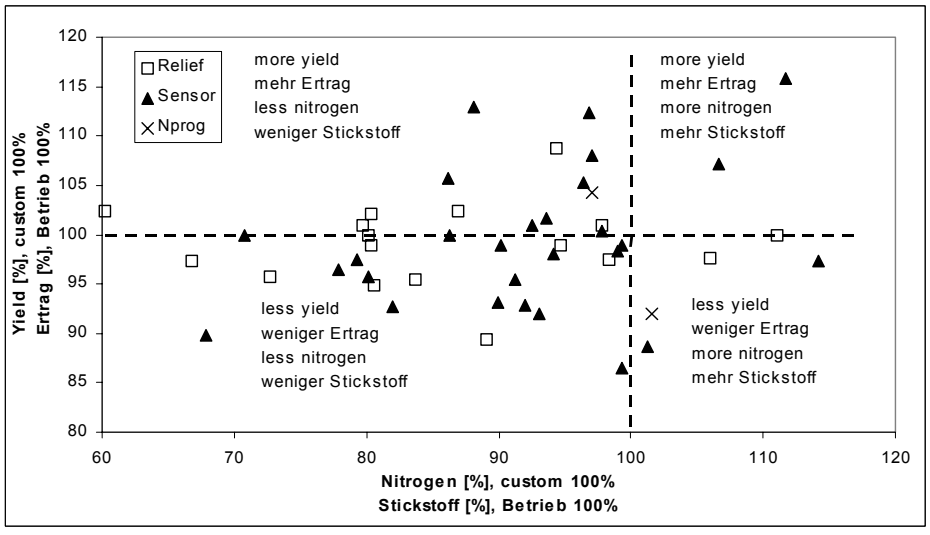



Bild 13: Vergleich von teilflächenspezifischer Düngung und Ertrag gegenüber betrieblichen Werten: mehrere Jahre und Kulturarten verschiedener Düngerstrategie

zu „Ausreissern“, d. h. mehr Stickstoff wurde ein geringerer Ertrag als vom Betrieb erwirtschaftet und umgekehrt.

An der Werteverteilung fällt auf, dass insgesamt weniger Stickstoff als betriebsüblich gestreut wurde. Vermutlich ist das höhere Ertragspotential der guten Teilflächen nicht hinreichend ausgeschöpft. Das mag an dem ortsüblichen, vom Betriebsleiter vorgegebenen N-Niveau liegen, das aus seiner Sicht als Mittel über den ganzen Schlag gilt, also für den guten Boden zu gering ausfällt.

Ist man nur am Ertrag interessiert, mag **Bild 14** als Einschätzung für den Erfolg einer teilflächenspezifischen Strategie dienen. Die teilflächenspezifischen Varianten weisen meist einen ähnlichen Ertrag wie der Betrieb auf: Die Hälfte der Versuchsvarianten erzielte einen Ertrag, der um nur ± 2,5 % um die betriebsübliche Referenz schwankt. Im Durchschnitt über alle Versuche liegt der Ertrag der teilflächenspezifischen Varianten bei 99,3 % des Betriebes bei einem Stickstoffaufwand von nur 91,9 %. Also wird generell der gleiche Ertrag mit etwas weniger N erzielt.

Insgesamt entsteht kein zusammenhängendes Bild, das eine Abhängigkeit der Ertragsunterschiede von der N-Gabe belegen könnte. Die Streubreite der Ergebnisse ist auch nicht auf eine spezielle Strategie zurückzuführen. Sie ist jeweils nach bester fachlich-methodischer Praxis realisiert, bringt mal das angestrebte Ertragsziel und mal nicht – aber immerhin liegt die Hälfte der Ergebnisse in der engen Spanne von ± 2,5 %. Diese Ertragswerte beziehen sich auf den gesamten Schlag, sind also nicht eine Stichprobe, bei der Streuung von Wiederholungen zu berücksichtigen wäre.

Aus Sicht der Statistik erscheint dies als sehr gutes Ergebnis. Einige N-Dünge-Modelle formulieren das Ertragsziel in weiten Stufen von 20 %.

Aus Sicht des Landwirts wären 2,5 dt/ha jedoch ein spürbarer Gewinn – als Nutzen notwendig angesichts der Kosten des Produktionssystems. Dieser Weg zur Ertragssteigerung liegt offenbar in Termin und Menge der N-Gabe. Gute Böden können offenbar etwas mehr Stickstoff verwerten als bisher gedüngt.

## Wirtschaftlichkeit

Die Beurteilung der Teilflächenbewirtschaftung umfasst mehrere Wirkungsbereiche des Systems:

- die generellen Möglichkeiten, die Bewirtschaftung rationeller und kontrolliert zu gestalten
- den Einfluss auf Ertrag und Qualität
- den Effekt auf die N- und Grunddüngung
- die Kosten für Investition und Betrieb
- die Abwägung von Kosten und Nutzen

### Investition und Kosten

Die Vorteile der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung werden mit Aufwand an Zeit und Technik erkauft. Dies wird von

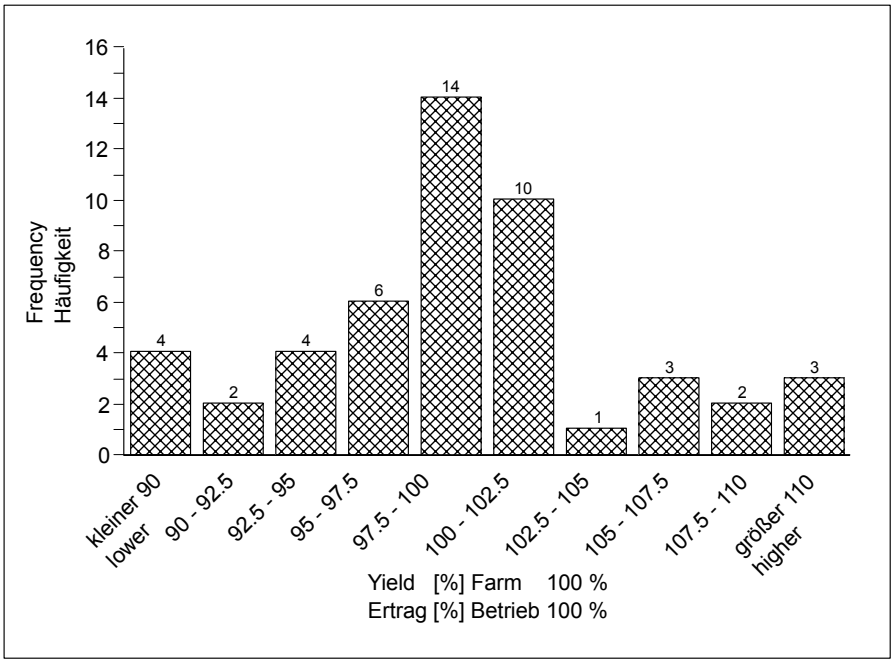



Bild 14: Häufigkeit der Erträge in den teilflächenspezifischen Varianten relativ zum Betrieb

Engeln für Betriebe mit 300 ha und 1000 ha dargestellt [29].

Es beginnt mit den Grunddaten zum Schlag, also der Aufarbeitung von Informationen zu Boden und Teilflächen durch den Betriebsleiter. Zu kalkulieren sind die Kosten für die Erfassung des Schlages mit GPS. Dafür berechnet die LUFA 60 € als Basis und 3 €/ha. Diese Investition gilt für mehrere Jahre, ist also mit Kosten von 0,5 €/ha zu bewerten.

Den Kern des Systems bildet die Ausstattung des Mähdreschers. Dafür werden vorbereitende Einführung, die Kalibrierung des Systems sowie die täglichen Arbeiten mit Zeit und Stundenkosten (15 €/h) angesetzt und schließlich die Auswertung mit Interpretation. Die Tätigkeiten sind im einzelnen in **Tabelle 4** aufgelistet. Den höchsten Wert nimmt die Interpretation der Ertragskarte ein – hier mit einer Beraterstunde angesetzt. Die Ausstattung mit der Ertragsmessung bedeutet Investitionen für Technik und Elektronik (**Tabelle 5**). Daraus resultieren Kosten, die für die Abschreibungszeit des Mähdreschers kalkuliert sind. Nur die eingebauten Geräte erhöhen mit der Zahl der Mähdrescher die Investition. Somit hat der größere Betrieb mit 3,5 €/ha halb so hohe Kosten für die Technik. Der zeitlichen Aufwand für die Bewertung nimmt entsprechend Tabelle 4 einen beachtlichen Anteil an den Kosten ein.

Konsequenterweise gehört die Düngung zum Precision-Farming, und damit die Ausstattung für den Streuer und vor allem die Zeit für die Bemessung der Teilgaben. Die entsprechenden Daten sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Die Kosten aus der Investition erscheinen wenig bedeutsam gegenüber den Ansätzen, die für den fachlichen Aufwand getroffen sind.

An dieser Stelle sei der N-Sensor genannt, der nach fachgerechter Kalibrierung die N-Gabe steuert. Das System kann einen Teil des Zeitaufwandes (**Tabelle 6**) sparen, und zwar etwa 4 €/ha. Das entspricht den Investitionskosten.

Insgesamt verdeutlichen die Tabellen die hohe Bedeutung des – zu lernenden – Umgangs mit dem gesamten System. Dieser Aufwand fällt weitgehend in die ohnehin belastete Zeitspanne. Dahinter tritt die Erwartung, dass die Technik preiswerter wird, zurück. Für beide Kostenarten erhält die jährliche Auslastung, hier an den beiden Betriebsgrößen dargestellt, ihre Bedeutung.

Die Summe der Kosten von 19 bzw. 12 €/ha muss also von dem Nutzen wettgemacht werden, der aus höherem Ertrag und/oder geringerem Aufwand insgesamt präziserer Produktionstechnik resultiert.

### Vorzüge in der Bewirtschaftung

Die präzise Kenntnis der Eigenschaften der Betriebsfläche erlaubt Konsequenzen für das Anbauverhältnis, die Produktionstechnik und die Zuordnung der Schläge.

Die Auswertung der Erträge sowie der Luftbilder kontrolliert und korrigiert die vorhandenen Daten und Grenzen der Reichsbodenschätzung. Damit erhalten Schläge bzw. Teile davon eine neue Be-

Tabelle 4: Dauer und Kosten der Tätigkeiten für die Ertragsmessung

| | Euro/Jahr für | |
|---|---|---|
| **Tätigkeiten** | **300 ha** | **1000 ha 2 Mähdrescher** |
| Einführung in Technik und Bedienung (4 h) | 60 | 120 |
| Kalibrieren: Schnittbreite, Leerlauf, Weg-Messung (2 h) | 30 | 60 |
| Kontrollwiegungen: 4 Bunkerinhalte, also 2 je Frucht | 150 | 300 |
| Eingabe der Schlagdaten und Speichern/Sichern auf PCMCIA (0,35 h/Tag) | 125 | 420 |
| Wartung (alle 3 Tage, bei schlechten Druschbedingungen häufiger) | 35 | 120 |
| Datensicherung auf PC, Erstellung von Ertragskarten (15 Min./Schlag, O 30 ha) | 40 | 125 |
| Interpretation (1 h/Schlag, 50 €/h) | 500 | 1.700 |
| Insgesamt €/Jahr | 940 | 2.845 |
| €/ha | 3,1 | 2,8 |

Tabelle 5:Kosten der Ertragsmessung für den Mähdrescher

| **Investition für 8 Jahre:** | **300 ha** | **1000 ha** |
|---|---|---|
| GPS-Empfänger | 1.000 € | 2.000 € |
| Küstenfunkempfänger | 1.500 € | 3.000 € |
| Hardware/Software | 4.000 € | 4.000 € |
| Softwareschulung | 500 € | 500 € |
| Ertrags- und Feuchtemessung | 4.000 € | 8.000 € |
| **Summe in €:** | 11.000 | 17.500 |
| Kosten (20 % A) **€/Jahr:** | 2.200 | 3.500 |
| **€/ha:** | 7,5 | 3,5 |
| Zuzüglich Zeitaufwand (Tab.) €/ha | 3,1 | 2,8 |
| **Summe €/ha** | 10,6 | 6,3 |

Tabelle 6: Kosten des technischen und fachlichen Aufwands in der teilflächenspezifischen Düngung

| **Investitionsbedarf: €** | | | | **300 ha** | **1000 ha** |
|---|---|---|---|---|---|
| Bordrechner | | 2.400 | | | |
| Jobrechner LH 5000 | | 1.200 | | | |
| Dosierverstellung | | 3.000 | ∑ 6.600 | | |
| Kosten (20 % A) | €/Jahr | | | 1.320 | 1.320 |
| | €/ha | | | 4,4 | 1,3 |
| **Zeitaufwand** | | | | | |
| Begehen der Teilflächen (3 x 0,75 h/ 30 ha) | | | | 1.100 | 3.700 |
| Erstellen der Applikationskarte (0,5 h/Schlag) | | | | 80 | 250 |
| **Kosten** | €/Jahr | | | 2.500 | 5.270 |
| | €/ha | | | 8,3 | 5,3 |

wertung. Damit wird der Anbau mehr oder minder intensiver Kulturarten genauer der naturgegebenen Ertragsfähigkeit sowie Bearbeitbarkeit angepasst.

Besonders auffallende Teilflächen werden spezifisch analysiert. Besteht die Möglichkeit, die Schwächen etwa aufgrund von Nährstoffmangel, Bodenverdichtung oder defekter Drainage zu meliorieren, so erhöht sich insgesamt der Wert der Fläche.

Im andern Fall liegt es nahe, derartige Flächenanteile zur Stillegung zusammenzufassen oder in einen Biotop-Verbund einzubringen. Als typisch dafür mögen Böden auf Sand oder Kies gelten oder die nassen Senken in der Fläche.

Ein weiteres Beispiel bildet der Randeffekt am Wald, Knick oder Vorgewende. So belegt die Ertragsmessung auf Rübenflächen, dass Bäume einen Randstreifen von 20 m beeinträchtigen. Bei 500 m Schlaglänge macht das bereits 1 ha aus. Der Ertrag wird um 10 bis 20 t/ha gesenkt, die Abzüge durch höheren Erdanhang und schlechtes Köpfen werden beachtlich gesteigert. Die Konsequenz liegt darin, den Aufwand für Bestellung, Düngung und Pflanzenschutz zu sparen, der nicht im rechten Verhältnis zum Minderertrag steht.

Die Kartierung der Flächen schafft genaue Unterlagen zu Umriss und Fläche des Schlages, wie sie zur Antragstellung für Prämien die Anbauplanung sowie den Tausch oder die Planung von Flächen bedeutsam sind. Als Nutzen steht, dass das Risiko von Fehlangaben behoben ist.

Ein weiterer Vorzug in diesem Zusammenhang liegt darin, Besonderheiten auf der Fläche mit den GPS-Koordinaten aufzunehmen. Das kann der Verlauf der Drainagestränge sein, gemäß Plan und kontrolliert vor Ort. Das kann die Position kritischer Hindernisse sein, etwa von Kontrollschächten, Grenzsteinen oder Masten. Dem Fahrer ist dann die Stelle zu signalisieren, bevor er in die Gefahr gerät. Immerhin verursacht ein Kanalschacht am Schneidwerk des Mähdreschers Schäden von mehreren 1000 €, die als Nutzen des GPS zu vermeiden wären.

Diese Erkenntnis erscheint vor allem im Rahmen des strukturellen Wandels bedeutsam, wenn die Flächen den Besitzer wechseln. Dann verlieren sich die Kenntnisse zu Schlaghistorie und Besonderheiten.

Die Arbeitstechnik auf den Flächen wird erleichtert, wenn Saison-AK oder Dienstleister Arbeiten übernehmen. Ihnen ist die Fläche zuvor fremd, die eingespeicherten Daten zur Position aber helfen. Das beugt Schäden und Verlustzeiten vor. Generell kommt die Kartierung dem überbetrieblichen Einsatz entgegen. Dessen Fahrer findet auf dem Bildschirm die Fläche und den geeigneten Weg dorthin. Damit wird GPS zur Basis der überbetrieblichen Logistik.

Der gezielt angelegte Feldversuch, ob mit Sorten- oder anbautechnischen Maßnahmen, schafft dem Betriebsleiter für seinen Standort Erfahrungen und Anregungen. Dazu gehört die gestaffelte Dünger- oder Pflanzenschutzgabe, das nicht behandelte „Fenster“ als Kontrolle, dazu gehört der Effekt einer Maßnahme generell, ob es um den Pflugverzicht oder die Fungizidbehandlung von Zuckerrüben geht. Ein Unterschied von wenigen % ist für den Betrieb relevant.

Diese Möglichkeiten anwendungsorientierter Versuche ergänzen das bestehende Versuchswesen. Sie bieten darüber hinaus den Vorzug, unter praxisgerechten Bedingungen mit realer Technik und Fläche zu arbeiten.

Das Wissen um Erträge und Besonderheiten der Schläge erleichtert die gemeinsame Bewirtschaftung mit Nachbarn. Sie können auf pragmatische Weise, aber fundierter Basis Flächen zusammenlegen oder tauschen (Pflugtausch), also die Flur in eigener Initiative umgestalten. Damit schafft man große, einheitliche Partien im Absatz, spart Wege- und Verlustzeiten in der Bewirtschaftung und somit etwa 5 % der Kosten.

All die gesamten Aspekte erbringen Vorzüge, nicht jeder tritt jedes Jahr als Nutzen auf. In ihrer Gesamtheit mögen sie die im Kap. „Investitionen und Kosten“ aufgeführten Kosten aufwiegen.

Der Hauptvorteil der teilflächenspezifischen Wirtschaftsweise aber soll in Nährstoffeffizienz und Ertrag liegen. Also müssen mindestens 30 kg/ha eingespart oder 1,5 dt/ha mehr geerntet werden. Diese Werte liegen innerhalb des in Bild 13 ermittelten Bereichs streuender Ergebnisse, müssten aber mit Sicherheit nachzuweisen sein.

Als Nebeneffekt in der Ernte wirkt sich der homogenere Bestand aus. Die Messwerte des N-Sensors nach erfolgter Sensor Düngung schwanken im Vergleich zu betriebsüblicher Düngung weniger. In der Ernte trifft der Mähdrescher auf einen gleichmäßigen Bestand. Der Fahrer begrenzt die Geschwindigkeit über den Schlag nicht wegen weniger Hochertragsflächen sondern kann insgesamt einen höheren Durchsatz erzielen, nach Messungen von Feiffer (19) um etwa 15 %. Entsprechend niedriger, also um 15 €/ha, liegen die Mähdruschkosten.

## Zusammenfassung

Die „teilflächenspezifische Bewirtschaftung“ passt alle produktionstechnischen Maßnahmen den kleinräumig wechselnden Wachstumsbedingungen an. Sie strebt mit entsprechend geeigneter Verfahrenstechnik eine höhere Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel sowie einen Zuwachs an Ertrag und Qualität an. Um diese Ziele zu erreichen, ist die Kenntnis der Unterschiede des Bodens, seiner natürlichen Ertragsfähigkeit und die Kenntnis des Pflanzenbestandes, seiner potentiellen Ertragserwartung, nötig.

Also werden zunächst die Grundsätze und eigenen Wege dargestellt, die einzelnen Teilflächen nach der Struktur der Oberfläche oder nach der Beprobung und Bodenansprache zu kennzeichnen.

Die praktische Durchführung der spezifischen Produktionstechnik stellt erhöhte Ansprüche an den Düngerstreuer hinsichtlich des Regelbereichs und des Streubilds sowie an den Mähdrescher bezüglich der Genauigkeit und Kontrolle der Ertragsmessung. Die eigenen Messungen unter den praxisgemäßen Verhältnissen ergänzen vorliegende Daten. Die Versuchsflächen liegen auf 30 ha-Schlägen, jede

Variante umfasst die Schlaglänge und somit 3 ha.

Der Kern des Produktionssystems liegt darin, die N-Gabe zum jeweiligen Termin für die jeweiligen Teilflächen präzise zu bestimmen. Dazu gibt es verschiedenartige Modelle und Vorgehensweisen. Die Kieler Methoden beruhen zum einen auf dem langfristigen rechnerischen Effekt von Witterung und Reichsbodenschätzung, vor allem aber auf der Bonitur vor Ort. Der Berater beurteilt die einzelnen Bestände und schätzt die Ertragserwartung ein. Den personellen Aufwand meidet der Reflexions-Sensor, der nach sachkundiger Kalibrierung die N-Gabe online steuert. Angesichts der methodischen Unsicherheit wurde auf den Großflächen die empfohlene Gabe variiert, um an der Wachstumsfunktion erkennen zu können, inwieweit die Empfehlung zutrifft.

Als Effekt ist ein etwas höherer Ertrag oder eine Einsparung an Dünger zu erwarten. Das besagen Ergebnisse aus der Literatur und der eigenen ersten Jahre. Eine Übersicht über Düngung und Ertrag zu den wichtigsten, langfristig vorliegenden Daten ergibt kein eindeutiges Bild. Weitere Auswertungen lassen eine relativ zur Ertragsdifferenz große Streuung von Erträgen erkennen innerhalb von Teilflächen, die eigentlich als gleich definiert sind. Deren Bemessung wäre also zu modifizieren. Des weiteren ergibt die Analyse an Hand der variierten N-Gaben, dass das Ertragspotential noch nicht ausgeschöpft ist.

Von besonderem Interesse erscheint die Darstellung aller Daten zu Ertrag und Düngung in einer Grafik. Die Werte aller Varianten sind denen der betriebsüblichen Wirtschaftsweise gegenübergestellt. Generell haben Düngestrategien mit weniger Stickstoff ähnliche Erträge erzielt. Insgesamt liegt die Hälfte der Varianten im engen Bereich von ±2,5 % um den betriebsüblichen Ertrag.

Die Wirtschaftlichkeit beruht also nach diesen Ergebnissen auf mehreren Effekten, die im einzelnen besprochen und den Kosten gegenübergestellt werden. Unter den Kosten werden hier auch die für die anfallenden Arbeiten, nicht nur die für die Investitionen einbezogen. Dieser Zeitaufwand nimmt einen beachtenswerten Anteil an den Vollkosten von 12 bis 19 €/ha. ein.

## Literatur


[1] *Adsett, J.F. und Zoerb, D.G.C.* (1991): Automated field monitoring of soil nitrate levels: Automated Agriculture for the 21st Century. ASAE Public, No. 1191, Am. Soc. of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 326-335.

[2] *Artmann, R. und Biller, R.* (1986): Elektronik in der pflanzlichen Produktion. – DLG-Manuskript Nr. 72, April 1986, Frankfurt am Main.

[3] *Auernhammer, H. und Demmel, M.* (1997): Die Stabilität von Ertragsstrukturen im mehrjährigen Vergleich. VDI-Berichte 1356, Tagung Landtechnik, Braunschweig pp. 245-248. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf

[4] *Basso, B. und Ritchie, J.T.* (1992): Application of crop models in precision agriculture. In: Tagungsband Precision Agriculture Tage 13-15.03.2002 in Bonn, KTBL-Sonderveröffentlichung, 181-191.

[5] *Bernhardt, G., Bischoff, L., Herlitzius, T.* (1996): Maschinenuntersuchung funktionaler Baugruppen von Mähdreschern. Agrartechnische Forschung 2(2), 138-143.

[6] *Beuche, H.; Hellebrand, H.J.* (1995): Technik für kleinräumige Bestandesführung - Hybrides Ortungssystem. KTBL Arbeitspapier 214, S.67-74

[7] *Blackmore, B.* (2002): The interpretation of trends from multiple yield maps. Computers and Electronics in Agriculture 26 (1), S. 37-51

[8] *Dammer, K.-H., Wartenberg, G. und Adameck, R.* (2000): Sensorgestützter teilflächenspezifischer Einsatz von Fungiziden und Halmstabilisatoren in Getreide. Gesunde Pflanzen 52, 105-109.

[9] DLG-Merkblatt 303 (1997): Ertragsermittlung im Mähdrescher – Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung.

[10] *Domsch, H und Winter, R.* (1994): Voraussetzungen für eine teilflächenspezifische Bodenbearbeitung und Aussaat. Institut für Agrartechnik Bornim, Forschungsbericht, 1-83.

[11] *Ehlert, D.* (2000): Pflanzenmasseerfassung mit mechanischen Sensoren. In: Tagungsband der Tagung Landtechnik 2000, VDI-Verlag, Düsseldorf, 289-294.

[12] *Ehlert, D. und Schmidt, H.* (1996): Ortsspezifische Biomasseerfassung in stehenden Pflanzenbeständen. Landtechnik 51, H.2, 70-86.

[13] *Engel, T.* (1996): Standortgerechte N-Düngung mit Hilfe von GPS, Elektronik und Stickstoff-Simulation. Landbauforschung Völkenrode 46(3), 127-133.

[14] *Engeln, P.* (1998): Teilflächenorientierte Düngetechnik und N-Variation sowie die Wirkung auf den Ertrag, VDI-MEG-Tagung Garching 1998.

[15] *Engeln, P.; Hackbarth, S.; Treue, P.* (1998): Teilflächenorientierte Düngetechnik und N-Variation sowie die Wirkung auf den Ertrag, Internationale VDI-MEG Tagung Landtechnik, VDI-Berichte 1449, 153-257, Düsseldorf 1998.

[16] *Engeln, P.; Hackbarth, S.; Treue, P.* (1999): Bodenheterogenität und landwirtschaftliche Produktionstechnik. Tagungsband: Bodenkundliche Gesellschaft.

[17] *Engeln, P.; Hackbarth, S.; Treue, P.* (1999): Effizienz der teilflächenspezifischen Düngung. Landtechnik 54. Jg., H. 2, 82-83

[18] *Feil, B.* (1998): Physiologische und pflanzenbauliche Aspekte der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Proteinkonzentration bei Getreidesorten: Eine Übersicht. Pflanzenbauwissenschaften 2, 37-46.

[19] *Feiffer, A.* (2003): Einfluss des Hydro N-Sensors auf die Mähdrescherleistung, Tagungsbericht Agricon Potsdam/Jahna.

[20] *Griepentrog, H.-W.* (1997): Teilflächenspezifische Düngung. Erfahrungen und Ergebnisse. Landtechnik 52, 124-125

[21] *Griepentrog, H.-W.* (1997): Teilflächenspezifische Düngung. Tagungsband VDI-MEG Tagung Landtechnik Braunschweig 1997. VDI-Berichte 1356, Düsseldorf, 89-92.

[22] *Griepentrog, H.-W.* (1997): Teilflächenspezifische Düngung. Welche Bedeutung haben Streubildcharakteristik und Arbeitsbreite? Landtechnik 52 (1), 12-13 und 52 (3), 124-125.

[23] *Griepentrog, H.-W.* (1998): Ertragsermittlung im Mähdrescher. Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier, Münster-Hiltrup.

[24] *Griepentrog, H.-W.; Isensee, E.* (1998): DGPS in der Landwirtschaft (Möglichkeiten, Kosten, Grenzen) RKL-Schrift 4.1.0, S.925-942

[25] *Griepentrog, H.-W. and Persson, K.* (2000) :Arbeitsqualität von Schleuderstreuern mit variabler Dosierung. Landtechnik 55, 142-143

[26] *Griepentrog, H.-W. and Persson, K.* (2001): A model to determine the positional lag for fertiliser spreaders. In: Proceeding 3rd European Conference on Precision Agriculture pp. 671-676. agro. Montpellier

[27] *Hackbarth, S.* (2003): Bodenkartierung für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. Dissertation in Vorbereitung, Universität Kiel.

[28] *Heege, H. J.; Reusch, S.* (1997): Zur teilflächenspezifischen Stickstoff-Kopfdüngung. Landtechnik 52, S. 126 ff.

[29] *Isensee, E. und Engeln, P.* (1999): Technik und Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Düngung und Ertragsmessung. Hochschultagung der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 88, 37-47.

[30] *Isensee, E. (*2000): Mineraldüngung, rationell mit dem passenden Streuer. Neue Landwirtschaft, Sonderhdft Hightech im Pflanzenbau, 42-45

[31] *Isensee, E., Engeln, P. Treue, Thiessen, E.* (2000): Technik der Stickstoffdüngung in der Teilflächenbewirtschaftung. Hochschultagung der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 99.

[32] *Isensee, E., Lieder, W.* (2001): Ertragsmessung in der Rübenernte. Landtechnik 56 (4), 272-273

[33] *Isensee, E.; Krippahl, St.* (2001): Online-Vergleich von Ertragssystemen im Mähdrescher. Landtechnik 56 (4), 274-275.

[34] *Isensee, E.; Böttcher, P.; Rademacher, J.* (2001): Aktuelle Entwicklungen zur Messung von Ertrag und Qualität pflanzlicher Produkte bei der Ernte. Hochschultagung

der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 100.

[35] *Jürschik, P., Giebel, A. und Wendroth, O.* (1998): Verarbeiten von Ertragsdaten aus Mähdreschern. Internationale VDI-MEG-Tagung Landtechnik1998. VDI-Berichte 1449, Düsseldorf, 215-221.

[36] *Kersebaum, K.C. und Richter, J.* (1985): Simulation der Stickstoffdynamik von Ackerstandorten unterschiedlicher Bodenart und Bewirtschaftung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 43, 649-654.

[37] *Kneib, W.* (1979): Untersuchungen zur Gruppierung von Böden als Grundlage für die Bodenkartierung – dargestellt an einem Landschaftsausschnitt der niederen Geest Schleswig-Holsteins. Dissertation der Universität Kiel.

[38] *Kormann, G., Demmel, M. und Auernhammer, H.* (1998): Entwicklung und Test eines Prüfstandes für Ertragsmesssysteme auf Mähdreschern. In: Internationale VDI-MEG-Tagung Landtechnik, VDI-Berichte 1449, 275-280.

[39] *Lamp, J. Bringkötter-Runde, K., Classen, A.L., Capelle, A., Ehlert, D., Jürschnik, P., Kloepfer, F., Nordmeyer, H., Schröder, D. und Werner, A.* (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: Lamp, J. (Hrsg): Memorandum zum KTBL-Fachgespräch Potsdam, KTBL, Darmstadt.

[40] *Lamp, J., Basten, M.* (1991): Using soil variability analysis and N-modelling for Computer Aided Farming (CAF) by soils. In: Soil and Groundwater Research Report II, Nitrate in soils. (Ed: Commission of the European Communities), Luxembourg, 55-63.

[41] *Lisso, H.* (2003): GPS-gestützte Teilflächenbewirtschaftung. RKL-Kartei 4.1.0, 1123-1143.

[42] *Marquering, J. und Scheufler, B.* (1997): Technische Probleme bei der teilflächenspezifischen Ausbringung von Produktionsmitteln. Zeitschrift für Agrarinformatik 97 (1), 9-14.

[43] Ministerium Ländlicher Räume, Baden Würtemberg (2000): Stickstoffdüngung im Ackerbau. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 1 (2. Auflage), Febr. 2000.

[44] *Mönike, S. und Bernhardt, G.* (1996): Entwicklung und Erprobung eines Sensors zur Messung der Feuchte im Boden zum Einsatz an beweglichen Maschinen. Landtechnik. VDI-Berichte 1297, 271-274.

[45] *Mutert, E., Lamp, J. und Kneib, W.* (1979): Zur regionalen Variabilität von Böden in Schleswig-Holstein. Mitteilungen der Dt. Bdk. Gesellschaft 29, 787-792. National Research Council (1997): Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management.

[46] *Persson, R.L., Skovsgaard, H. und Bangsgaard, H.* (1999): Anbau-Zweischeiben-Düngerstreuer BREDAL B2XL (Europäischer Prüfbericht). Technischer Bericht, Danish Institute of Agricultural Sciences & European Network for Testing Agricultural Machinery.

[47] *Rabe, S.* (1998): Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Düngung, Diplomarbeit Kiel.

[48] *Reimer, G.* (2003): Spektrale Naherkundung und Ertragskartierung als Basis von digitalen Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau. Dissertation 2003, Kiel

[49] *Reusch, S.* (1997): Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation, Universität Kiel. MEG-Schrift Nr. 303.

[50] *Reusch, S. und Heege, H.-J.* (1995): Berührungslose Messung des Stickstoffbedarfs von Kulturpflanzen. In 53. Internationale Tagung Landtechnik, Braunschweig, 12./13. Oktober 1995, VDI-Berichte 1211, Düsseldorf, 1995, 149 ff.

[51] *Schoop, P.* (1987): Computergestützte Prognosemodelle zur Berücksichtigung der Witterung bei der Stickstoffdüngung im Getreidebau. In: Schriftenreihe der Agrarwissenschaften Fakultät Kiel, Heft 69, 149-158.

[52] *Schoop, P.* (1996): Vorstellung eines Modells und Forschungskonzeptes zur Quantifizierung und Optimierung der N-Düngung unter Berücksichtigung von ökologischen und produktionstechnischen Einflussfaktoren. Landbauforschung Völkenrode 46(3), 141-149.

[53] *Schoop, P. und Hanus, H.* (1989a): Nutzung von Computermodellen zur Steuerung des Stickstoffeinsatzes im Getreidebau unter gleichzeitiger Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Ziele. Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 71, 163-172.

[54] *Schoop, P. und Hanus, H.* (1989b): Computergestütztes Prognosemodell zur Berücksichtigung der Witterung, sorten- und schlagspezifischer Parameter bei der Stickstoffdüngung im Getreidebau. Agrarinformatik 16, 185-194.

[55] *Schoop, P., Hanus, H. und Treue, P.* (1999): Modelle und Praxisergebnisse zur Optimierung der Stickstoffdüngung für unterschiedliche Standorte und Teilschläge. Hochschultagung der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 82, 1999.

[56] *Schmidhalter, U. und Selige, T.* (2002): Fernerkundungsgestützte Ableitung bodenbürtiger Ertragspotentiale für standortspezifische Bewirtschaftung (TP II-6a, Teil III). In: Tagungsband Precision Agriculture Tage 13.-15.03.2002 in Bonn. KTBL-Sonderveröffentlichung, 211-218.

[57] *Sudduth, K.A. und Hummel, J.W.* (1993): Soil organic matter & moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer: Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 36 (6), 1571-1582.

[58] *Thiessen, E.* (2000): Sensorgesteuerte Stickstoffdüngung. Landtechnik 55, H. 2, 133-145.

[59] *Thiessen, E.* (2002): Optische Sensortechnik für den teilflächenspezifischen Einsatz von Agrarchemikalien. Dissertation Kiel, MEG-Schrift 399.

[60] *Treue, P.* (2002): Potenziale und Grenzen teilflächenspezifischer N-Düngung in Schleswig-Holstein/Precision Agriculture, Dissertation Kiel.

[61] *Voßhenrich, H.* (2002): Technik für ortsspezifische Bodenbearbeitung. Tagungsband „preagro“, KTBL-Sonderveröffentlichung 038, 237-249.

[62] *Wehrmann, J. und Scharpf, H.C.* (1979): Der Mineralstickstoffgehalt des Bodens als Maßstab für den Stickstoffdüngerbedarf ($N_{min}$-Methode). Plant and Soil 52, 109-126.

[63] *Werner, A., Kettner, E., Pauly, J., Reining, E., Roth, R., Kühn, J., Selige, T., Bobert, J., Schmidhalter, U., Hufnagel, J.* (1992): Ertragspotentiale von Teilflächen innerhalb von Ackerschlägen als Schlüsselgröße für die Bestandesführung von precision agriculture. In: Tagungsband Precision Agriculture, KTBL-Sonderveröffentlichung 038, 193-200.

[64] *Wilde, K., Steinmayr, T. und Auernhammer H.* (1998): Leistungsanalysen bei DGPS-Ortungssystemen im landwirtschaftlichen Langzeiteinsatz. Internationale VDI-MEG Tagung Landtechnik 1998, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998, 203-209.

[65] *Wollring, J. und Reusch, S.* (1999): Stickstoff variabel düngen – Sensor misst Versorgung der Pflanzen. In: dlz-agrarmagazin, Sonderheft 10, BLV-Verlag, München, 30-34.

[66] *Wollring, J. und Wehrmann, J.* (1981): Der Nitrat-Schnelltest – Entscheidungshilfe für die N-Spätdüngung. DLG-Mitteilungen 8, 448-449.

**Autoren**

Prof. Dr. Edmund Isensee
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
Tel. 0431 880 2658
Fax 0431 880 4283
E-mail: landtechnik@ilv.uni-kiel.de

Dr. Eiko Thiessen
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik
Tel. 0431 880 2658
Fax 0431 880 4283
E-mail: landtechnik@ilv.uni-kiel.de

Dipl.-Geol. Peter Treue
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenzüchtung und Populationsgenetik
Tel. 0431 880 4398
E-Mail: ptreue@pflanzenbau.uni-kiel.de