

Link

[www.oekolandbau.wzw.tum.de](http://www.oekolandbau.wzw.tum.de)

# Schutz des Grundwassers ohne Ertrags- einbußen

**Das „Bergfeld“** – ein 13 ha (130 000 m<sup>2</sup>) großer Ackerschlag in der Versuchsstation Roggenstein der TUM. Dargestellt ist eine Ertragskarte, die im 10 x 10 Meter-Raster unterschiedliche Ertragszonen des Schlages zeigt. Datengrundlage: Ertrags erfassung mit Sensoren.



**Viel hilft viel, das gilt beim Düngen nicht generell: Gute Ernten hängen von verschiedenen Faktoren ab, und zu viel Stickstoffdünger belastet vor allem das Grundwasser. Prof. Kurt-Jürgen Hülsbergen und Dr. Franz-Xaver Maidl vom Wissenschaftszentrum Weihenstephan haben es sich zur Aufgabe gemacht, den Landwirten digitale Werkzeuge an die Hand zu geben, mit denen sie die optimale Düngermenge bestimmen können. So ermöglichen es die Forscher der TUM, gute Erträge zu erwirtschaften und trotzdem das Grundwasser nicht zu stark mit Nitrat zu belasten.**



Die weiße Haube, die dicht auf dem Boden aufgesetzt wird, dient zur Messung der Lachgasmenge, die der Boden abgibt. Mit der Pumpe (rechts) werden Probenröhrchen (oben) gefüllt, die anschließend im Labor analysiert werden.



Man könnte sagen, sie arbeiten im Auge des Sturms. Prof. Kurt-Jürgen Hülsbergen und Dr. Franz-Xaver Maidl erforschen die effiziente Stickstoffnutzung in der Landwirtschaft und sind damit in einem hochaktuellen Feld unterwegs. Im Juni 2018 verurteilte der Europäische Gerichtshof Deutschland wegen der Verletzung der EU-Nitratrichtlinie. Diese verpflichtet, einen Grenzwert von 50 Milligramm pro Liter Grundwasser einzuhalten. Seit 2008 wird dieser Grenzwert hierzulande jedoch jedes Jahr an mindestens 16,9 % der Messstellen überschritten. Die Landwirtschaft ist der wichtigste Verursacher hoher Nitrat-

konzentrationen im Grundwasser. Mittlerweile hat Deutschland seine Düngeverordnung zwar überarbeitet, aber es zeichnet sich ab, dass dies nicht ausreichen wird. Hülsbergen leitet am Wissenschaftszentrum Weihenstephan den Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme. Der Agrarwissenschaftler beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit dem Stickstoffmanagement in der Landwirtschaft. Über die Jahre entstand das Modell RE-PRO, ein digitales System, das computergestützt die Stoff- und Energieflüsse landwirtschaftlicher Betriebe analysiert, bewertet und optimiert.



**Darstellung von Reflexionsdaten**, die mit einem multispektralen Sensor auf dem „Bergfeld“ in einem Winterweizenbestand gemessen wurden.

*„Heute hat die Frage nach Stickstoffeffizienz Konjunktur, aber das war nicht immer so.“*

*Kurt-Jürgen Hülsbergen*

Bildquellen: Kurt Bauer; Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM)

Der Professor und sein Team erfassen dazu zum Beispiel Daten zu Nutzfläche, Pflanzenertrag, Tierhaltung, Bodenqualität, Mineraldüngung und Gülle und entwickeln daraus Modelle von Stoffkreisläufen, die – im Fall von Stickstoff – Überschüsse oder Mängel aufzeigen und Hinweise auf Maßnahmen zur Verbesserung liefern. Eine solche könnte die Anpassung der Mineraldüngermenge an die Gülleausbringung sein, denn dort, wo Gülle verwendet wird, vermindert sich entsprechend der Bedarf an zusätzlichem Stickstoffdünger.

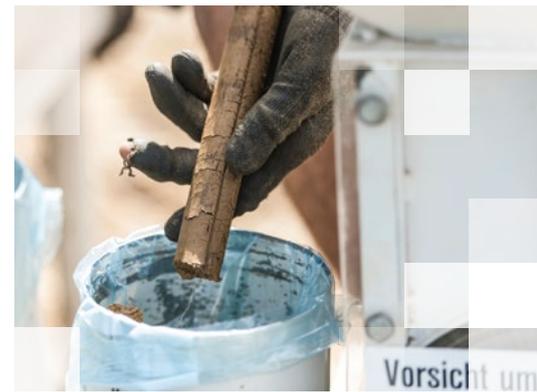
In den Analysealgorithmen steckt Wissen aus jahrelangen Feldexperimenten: Wie wirken sich Düngerart, -menge und der Düngezeitpunkt auf Ertrag und Produktqualität aus? Wie viel Stickstoff entweicht in die Luft oder ins Wasser? Welchen Einfluss haben Bodeneigenschaften und Witterung auf den Stickstoffumsatz im Boden? „Im Rückblick bin ich froh, dass wir so viele Jahre an dem Thema Stickstoffmanagement drangeblieben sind“, sagt Hülsbergen. „Heute hat die Frage nach Stickstoffeffizienz Konjunktur, aber das war nicht immer so.“



### Ein Online-Tool für digitales Nährstoffmanagement

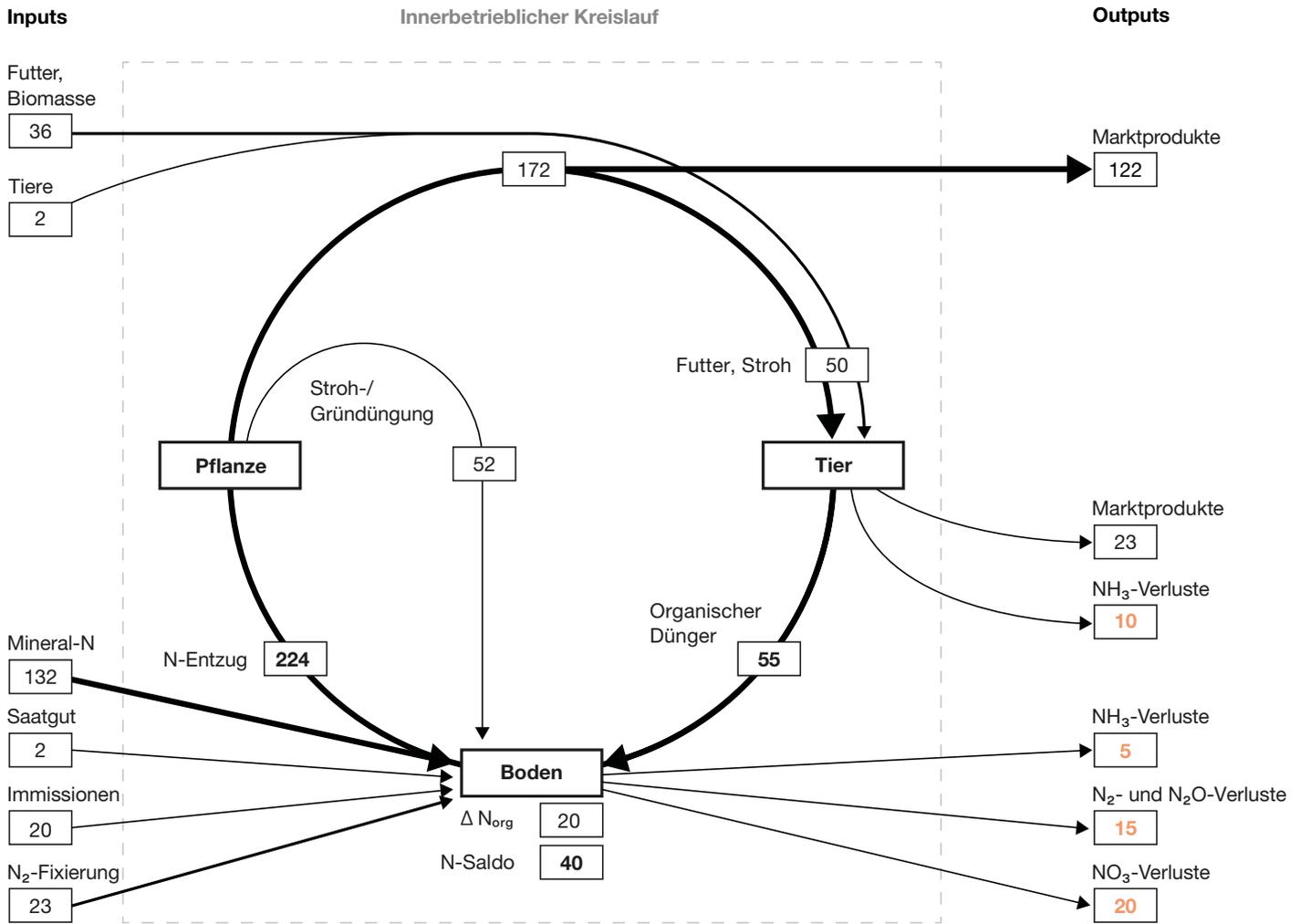
Das Modell REPRO profitiert auch von den Fortschritten in der Sensortechnik. Je stärker sich die Landwirtschaft digitalisiert und mit Methoden des Precision Farming – wie man heute den Präzisionsackerbau nennt, der auch Unterschiede innerhalb der Felder berücksichtigt – arbeitet, desto mehr Daten liegen vor. Das erfordert neue IT-Lösungen, um verschiedenste Datenquellen in das Gesamtsystem zu integrieren. Aktuell bauen die Forscher REPRO zu einem Nährstoffmanagement-System aus, das sie Web-Man nennen. Dieses digitale Tool soll nun in die praktische Anwendung gehen. Mit ihm sollen speziell geschulte Landwirte oder Berater Betriebe analysieren und Optimierungsmaßnahmen ausarbeiten. Es richtet sich gleichermaßen an ökologische und konventionell wirtschaftende Betriebe. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt und die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung fördern diese Arbeiten.

Web-Man berechnet nicht nur Stoffkreisläufe, sondern enthält leistungsfähige Algorithmen zur Datenauswertung, die Informationen als Grundlage für Entscheidungen generieren. Es berät damit die Anwender und macht konkrete Optimierungsvorschläge. Heute ist es noch ein Prototyp, anhand dessen Hülsbergen und seine Spezialisten die Bauern beraten. „Wir können die Landwirte ja nicht mit den Ergebnissen alleine lassen“, so der Professor. Gleichzeitig arbeiten aber am Lehrstuhl IT-Spezialisten, die auf Basis von Expertenwissen und künstlicher Intelligenz automatische Entscheidungsalgorithmen entwickeln. Weitere Informatiker gestalten gemeinsam mit den Agrarexperten nutzerfreundliche und selbsterklärende Bedienoberflächen, sodass die Nutzer das fertige Tool auch unabhängig von den Forschern bedienen können. ▶

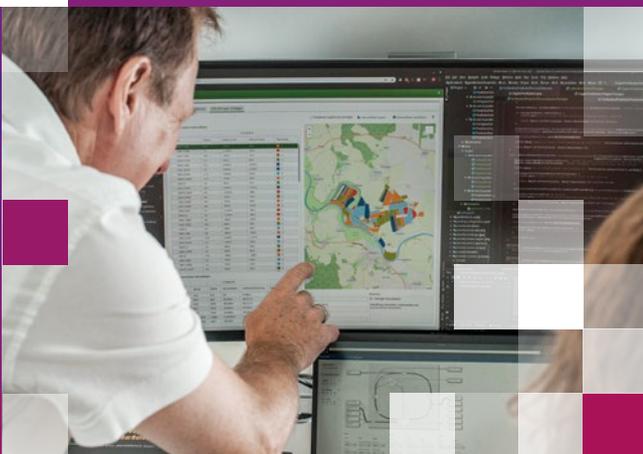


Um die Bodenwerte in ihren Datenbanken stets auf dem neuesten Stand zu halten, entnehmen die Forscher regelmäßig Bodenproben mit einem kleinen Bohrer. Die Bohrkerns werden anschließend analysiert.





**Oben:** Der Stickstoffkreislauf in einem landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb, berechnet mit dem Modell REPRO: Die Zahlen geben jeweils die Stickstoffmenge in Kilogramm pro Hektar und Jahr an. Rote Zahlen bezeichnen Werte mit Verbesserungsbedarf. **Unten:** Hülsgen demonstriert am Computer das digitale Werkzeug Web-Man. Das gepixelte Bild zeigt den Stickstoff-Saldo auf dem Bergfeld Roggenstein 2018.

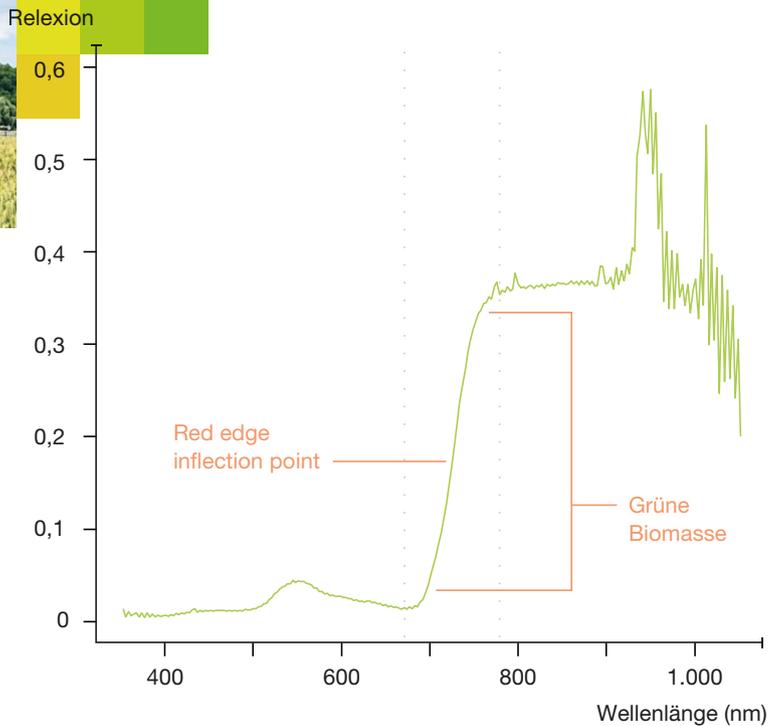


*„Wir können die Landwirte ja nicht mit den Ergebnissen alleine lassen.“*

Kurt-Jürgen Hülsgen



**Vorne messen, hinten streuen:** Sensoren am Gestänge vorne am Traktor erfassen die aktuellen Reflexionswerte, der Computer verrechnet sie in Echtzeit und steuert mit den Werten punktgenau den hinten angebrachten Düngestreuer. Unten das Reflexionsspektrum eines Pflanzenbestandes.



#### Wie Sensoren den Düngbedarf von Pflanzen erkennen

Kommerzielle Sensoren für bedarfsgerechte Düngung messen das Licht, das von Pflanzen reflektiert wird. Sie arbeiten mit nur zwei bis vier Wellenlängen, die sich für wenige Nutzpflanzen eignen. Maidl will die Technik auf weitere Pflanzen, zum Beispiel Mais, und andere Pflanzeigenschaften ausweiten. Jede Pflanze hat ein anderes Reflexionsspektrum, das sich im Lauf des Wachstums verändert und von Wetter und Tageszeit abhängt. Unterschiedliche Wellenlängen erlauben die Erfassung verschiedener Pflanzeigenschaften. Maidls multispektraler Sensor misst 220 verschiedene Wellenlängen und erfasst die gesuchten Eigenschaften für verschiedene Pflanzen, Tageszeiten und Witterungen genau. Die Grundlagen dafür erarbeitet er mithilfe der Spektralmessungen in den umfangreichen Versuchspartzellen. Gleichzeitig bestimmt er auf dem Feld Biomasse und Ertrag sowie im Labor den Stickstoffgehalt der Pflanzen, im Fall von Getreide auch den Proteingehalt im Korn. Über die Jahre entstand so ein riesiger Datenschatz. Aus der Korrelation verschiedener Spektralmessungen und Pflanzenanalysen leitet Maidl sozusagen Fingerabdrücke für die jeweilige Pflanze und den gefragten Parameter ab. Darauf beruhen dann die jeweiligen Düngelgorithmen.

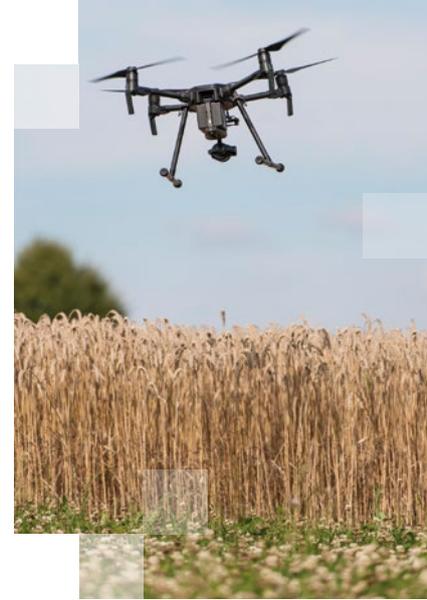
#### Mit Precision Farming Stickstoff einsparen

Parallel zur Entwicklung von Web-Man erforscht Hülsbergens Mitarbeiter Maidl einen sensorgestützten Ansatz zur effizienten Stickstoffnutzung nach dem Motto „Frag’ die Pflanze, was sie braucht“. Er misst den Stickstoff-Ernährungsstatus der Pflanzen direkt und berechnet daraus die optimale Düngermenge – unter Berücksichtigung des Wachstumsstadiums, der Bodengüte und der angestrebten Produktqualität. Seine Technologie wird derzeit in Web-Man integriert.

Die Grundlage für das Verfahren ist das Reflexionsverhalten der Pflanzen. Sie absorbieren sichtbares Licht für die Photosynthese und reflektieren den langwelligeren, nah-infraroten Spektralbereich sehr stark. Misst man das reflektierte Licht spektral aufgelöst, ergeben sich für verschiedene Wellenlängen unterschiedliche Reflexionswerte. Aus diesen Reflexionskurven kann man bestimmte Parameter wie die Menge an Biomasse oder die Stickstoffaufnahme berechnen.



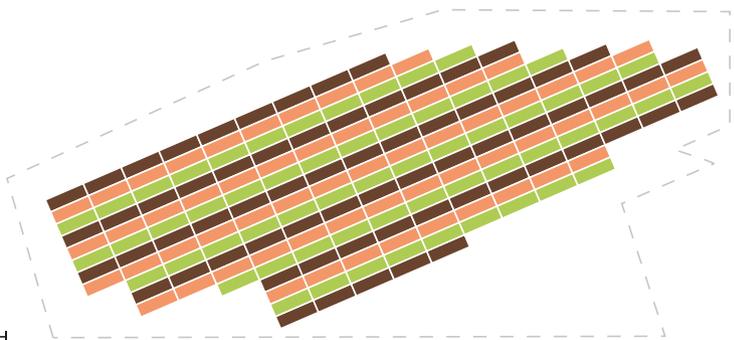
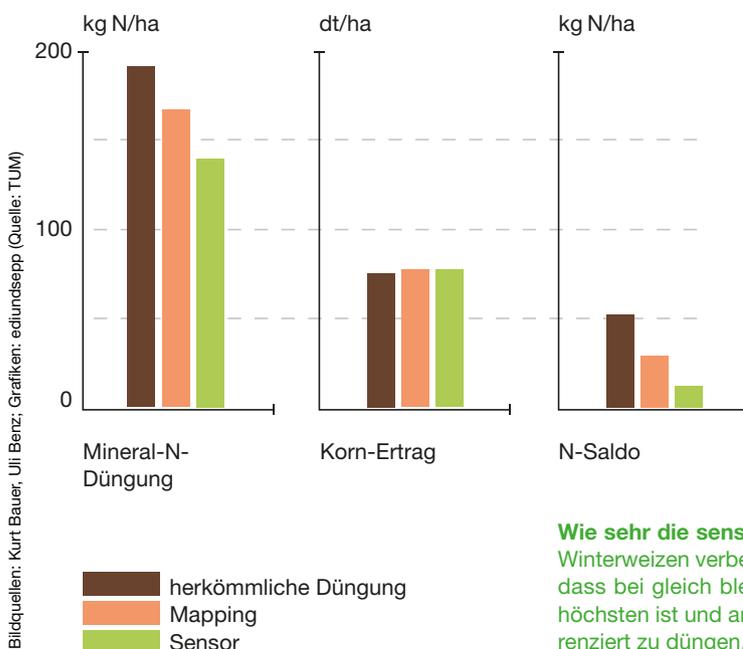
Diese Technik wird heute teilweise schon genutzt, meist auf Basis von satellitengestützten Messungen. Maidls Lösung hingegen ist viel direkter, nämlich ein am Traktor montiertes und mit der Düngevorrichtung gekoppeltes System. Es arbeitet sehr viel präziser – auch weil Mess- und Düngzeitpunkt übereinstimmen. Man bestimmt in einem Arbeitsgang den Stickstoffgehalt der Pflanze, berechnet in Echtzeit die richtige Düngermenge und bringt sie punktgenau aus. Dieses Vorgehen eröffnet den Weg zu einer sehr viel genaueren Dosierung des Düngers als bisher. Heute berechnen Landwirte die Düngermenge für ein Feld oder einen Schlag in der Regel pauschal aus dem durchschnittlichen Ertrag und der mittleren Bodengüte. In Wirklichkeit jedoch variieren Bodeneigenschaften, Ertragspotenzial und Düngbedarf kleinräumig auch innerhalb eines Feldes. An Stellen, die vom Mittelwert des Feldes abweichen, bekommen die Pflanzen deshalb zu viel oder zu wenig Dünger. Überschüssiger Stickstoff bleibt im Boden zurück, reichert sich über die Jahre an und entweicht irgendwann in die Umwelt, etwa ins Grundwasser. Sensorgestütztes Düngen schafft hier Abhilfe: Versuche mit Wintergerste in der Versuchsstation Roggenstein erzielten mit fast einem Viertel weniger Stickstoff den gleichen Ertrag. Ähnliche Ergebnisse erreichten die Wissenschaftler bei Winterweizen und Winterraps.



**Auch durch die Überfliegung mit Drohnen lassen sich Erträge gut erfassen. Die Drohne kann dabei Sensoren, eine optische oder eine Wärmebildkamera tragen.**

### Sensormessungen geben Bauern Sicherheit

Die Ansätze der Weihenstephaner Forscher überzeugen auch Praktiker, beispielsweise im Forschungsprojekt „Hohenthann“ im Landkreis Landshut. Die Region hat viele intensive Tierhaltungsbetriebe und kämpft wegen der hohen Güllemengen mit steigenden Nitratgehalten im Grundwasser. Hülsbergen und Maidl analysierten in Betrieben, die für den Standort typisch sind, die Stickstoffflüsse. Sie zeigten auf, wo und warum Nitrat in die Umgebung entweicht und leiteten Maßnahmen zum Grundwasserschutz ab, etwa über den Zeitpunkt der Gülleausbringung oder über eine Modifikation des Tierfutters. Zusätzlich liefen Feldversuche mit sensorgestützter Düngung. Sie erwies sich als leistungsfähiges Instrument, um die Stickstoffeffizienz zu erhöhen. Die Messungen zeigten, dass Böden, die jahrelang gegüllt wurden, viel Stickstoff liefern. Man muss dort den zusätzlichen Dünger deutlich reduzieren, um die Nitrat-Grenzwerte einzuhalten. ▶



**Wie sehr die sensorgestützte teilflächenspezifische Düngung die Stickstoffeffizienz von Winterweizen verbessern kann, zeigt sich für das Bergfeld Roggenstein: Der Vergleich belegt, dass bei gleich bleibendem Ertrag bei herkömmlicher Düngung der Düngerverbrauch am höchsten ist und am Ende am meisten Stickstoff im Boden zurückbleibt. Besser ist es, differenziert zu düngen, und mit sensorgesteuerter Düngung sind die Werte am besten.**

Bildquellen: Kurt Bauer, Uli Benz; Grafiken: edlundsepp (Quelle: TUM)

*„Mit einem passenden Düngealgorithmus hätten die Landwirte keine Ertragseinbußen, und die Gesellschaft würde von der guten Wasserqualität profitieren.“*

*Kurt-Jürgen Hülsbergen*

Auch hier ist das Bergfeld Roggenstein zu sehen. Die Farbwerte stehen für die Stickstoff-Aufnahme der Pflanzen im Jahr 2018.

### **Fruchtfolgen optimieren**

Vor einem ganz anderen Problem stehen viele Biobauern: Sie verwenden organische Dünger wie Gülle und Stallmist, aber keinen Stickstoff aus Mineraldünger. Die Biorichtlinien begrenzen zudem die Zahl der Tiere pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche. So wird Stickstoff zum knappen Gut, der häufig den Ertrag limitiert. Es kommt also auf einen effizienten Umgang mit dem Nährstoff an.

Ein wichtiges Instrument sind in diesem Fall Leguminosen, also Pflanzen wie Rotklee, Luzerne oder Sojabohnen, die

Stickstoff im Boden fixieren. Dort durchläuft er Mineralisierungsprozesse, die ihn für die folgenden Nutzpflanzen aufnahmefähig machen. Ein Teil des Stickstoffs wird dabei langfristig im Humus gebunden. Je nach Bodenbeschaffenheit und Witterungsverlauf geschieht das unterschiedlich schnell. Die Pflanzen wiederum nehmen je nach Wachstumsstadium unterschiedlich viel Stickstoff auf. Die Herausforderung ist also, Fruchtfolge und organische Düngung so abzustimmen, dass unter Berücksichtigung der ablaufenden Bodenprozesse die Nutzpflanze immer optimal versorgt ist. Ein Modell, das diese Prozesse beschreibt und geeignete Düngealgorithmen für den ökologischen Landbau enthält, gibt es bisher noch nicht. Hülsbergen und Maidl wollen sie als zusätzliche Module in Web-Man integrieren.



---

### **Dr. Franz-Xaver Maidl**

---

Wenn er nicht an der TUM forscht, bewirtschaftet Maidl in Niederbayern den ehemals elterlichen Bauernhof. „Der Hof ist auch so eine Art Versuchsstation,“ meint er. Man merke sofort, welcher Ansatz für Landwirte wichtig und in der Praxis umsetzbar sei. „Den weiten Bogen von der Grundlagenforschung bis hin zur Anwendung auf dem Feld bekommt man nur hin, wenn man viel Kontakt zur Praxis hat.“ In der Gemeinde ist Maidl ein gefragter Mitbürger. Viele holen sich Rat, aktuell zum Beispiel wegen Neuerungen in der Düngeverordnung.

Maidl hat an der TUM Agrarwissenschaften studiert und über Stickstoffdynamik im Boden promoviert. Ein Forschungsprojekt am DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), das mithilfe von Flugzeugmessungen den Ernährungsstatus von Pflanzen erfassen sollte, erregte seine Aufmerksamkeit und brachte ihn zu seinem Forschungsthema, der sensorgestützten, bedarfsgerechten Düngung. Ein von ihm entwickeltes und patentiertes System ist in den Sensoren Isaria und Crop Sense auf dem Markt.

---



**Prof. Kurt-Jürgen Hülsbergen**

Hülsbergen stammt von einem Bauernhof in der Magdeburger Börde und studierte Agrarwissenschaften an der Universität Halle-Wittenberg. Nach der Promotion 1990 baute er dort das Fach Ökologischer Landbau mit auf. 2002 habilitierte er sich und wurde 2003 an den Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TUM berufen. Mit dem Umzug nach Freising wechselte der Forscher in eine völlig anders strukturierte Landwirtschaft: „In Bayern ist die durchschnittliche Schlaggröße 1,8 Hektar, zuhause gibt es Schläge mit 50 bis 150 Hektar. Ein Feld dort ist das Vielfache eines ganzen Betriebes hier.“ Hülsbergen wohnt in der Hallertau und hat die Arbeit quasi vor dem Fenster: „Auch beim Hopfen ist Nitrat ein Riesenthema.“

### Grundwasserschonendes Nährstoffmanagement

Die Forscher treibt an, „dass wir mit unserer Arbeit viel Stickstoff einsparen und die Umwelt entlasten können“, erklärt Hülsbergen. „Mit einem passenden Düngealgorithmus hätten die Landwirte keine Ertragseinbußen, und die Gesellschaft würde von der guten Wasserqualität profitieren.“ Man könnte noch weiter gehen und die Düngealgorithmen nicht auf Ertrag, sondern auf Trinkwasserschutz optimieren. Das Modell kann solche Szenarien durchspielen und die jeweiligen Ertragsverluste aufzeigen. Daraus könnte man dann mögliche Kompensationen für die Landwirte ableiten.

Für die nächste Bauergeneration sind solche Konzepte vielleicht schon selbstverständlich. Zumindest tun Maidl und Hülsbergen einiges dafür, indem sie sich stark in der Lehre engagieren. „Viele studieren heute Agrarwissenschaft, weil sie mithilfe moderner Technologien die Welt verbessern wollen“, beobachtet Hülsbergen. „Das passt uns gut, denn wir wollen die Studierenden für eine umweltverträgliche Landwirtschaft begeistern. Digitalisierung und Precision Farming sind dafür wichtige und innovative Ansätze.“

Christine Rüth

### Stickstoff in der Landwirtschaft

Pflanzen brauchen Stickstoff zum Wachsen und können ihn nur in bestimmten Formen – überwiegend als Ammonium oder Nitrat – aufnehmen. Mineraldünger liefert direkt pflanzenverfügbaren Stickstoff, der schnell aufgenommen wird. In Gülle, Mist und Kompost ist der Stickstoff überwiegend organisch gebunden. Er bleibt über Jahre oder Jahrzehnte im Boden und wird langsam mineralisiert. Leguminosen binden Stickstoff aus der Luft, fixieren ihn im Boden und stellen ihn so den Folgekulturen zur Verfügung. Ist zu viel organisch gebundener Stickstoff, beispielsweise aus Gülle, vorhanden, reichert er sich über Jahrzehnte im Boden an. Der Überschuss-Stickstoff kann in Grundwasser, Flüsse und Seen gelangen. So gefährdet er Ökosysteme und Trinkwasser. Aus der Gülle entweicht Ammoniak, das sich in der Luft verteilt und so Gebiete „düngt“, in denen dies nicht erwünscht ist. So trägt Stickstoff auch zum Artensterben bei. Zusätzlich wird er durch bestimmte Umsetzungsprozesse in Form von Lachgas freigesetzt. Dieses ist ein hochwirksames Treibhausgas und deshalb schon in kleinsten Mengen kritisch.