

## Ein Modellökosystem zur Abschätzung der Wechselwirkungen zwischen Pflanzenproduktion und Umwelt

TORSTEN HINZ, WOLFGANG PAUL und HERMANN SPECKMANN

Institut für Biosystemtechnik

### 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die landwirtschaftliche Produktion steht mit allen Kompartimenten der Umwelt - Luft, Wasser, Boden und Biota - in wechselseitiger Beziehung und Abhängigkeit. Hierzu gehören auch die gezielten Stoffeinträge durch Dünger und Pflanzenschutzmittel, die zur Sicherung der Nahrungsmittelproduktion erforderlich sind, aber auch zu Belastungen einzelner Umweltkompartimente führen können. Ein Beispiel hierfür ist die Güllewirtschaft an der Schnittstelle Tierproduktion/Pflanzenbau. Um derartige Belastungen und ev. Risiken abschätzen zu können, sind umfangreiche Untersuchungen nötig, aus denen Konsequenzen zum Handeln z. B. durch Minderungsstrategien gezogen werden können. Messungen zum Stoffverbleib und -transport sind unter Feldbedingungen wegen der Vielzahl von wechselnden und stark veränderlichen Parametern außerordentlich aufwendig und schwierig durchzuführen. In einem Modellökosystem mit einstellbaren Parametern sind grundlegende Untersuchungen mit reproduzierbaren Ergebnissen möglich, soweit die Verhältnisse bezüglich der Luftbewegung, der Sonnenstrahlung, der Beregnung und der Bodeneigenschaften, d. h. der Wachstumsverhältnisse in der Natur hinreichend genau wiedergegeben sind. Um solche 'naturnahen' Verhältnisse in Laborumgebung nachzubilden, wurde der sog. Ökokanal im Institut für Biosystemtechnik geschaffen. Dieser besteht grundlegend aus einem Lysimetersystem in einem Windkanal, so daß die Möglichkeit besteht, die Hauptklimaparameter Wind, Strahlung, Regen und Bodentemperatur einzustellen. Mit den Lysimetern ist die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche gewachsene Bodenkerne einzubeziehen, d. h. der Pflanzenbewuchs steht auf ungestörtem Boden. Die wichtigsten Daten zur Beschreibung der Umgebungsbedingungen - Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, rel. Feuchte, Gesamtstrahlung und PAR sowie Bodentemperatur und -feuchte - werden mit Standardmeßtechniken aufgenommen und können geregelt werden. Zusätzlich werden zur Bilanzierung und Analyse von Stoffströmen moderne Meßtechniken wie FTIR, GC oder HPLC eingesetzt. Zur Beobachtung von Einzelpflanzen und Beständen, z. B. hinsichtlich der Wirkung einer Stickstoffdüngung, werden neue Meßtechniken wie z. B. Methoden der Bildverarbeitung unter definierten Verhältnissen getestet.

Mit dem Einsatz der o. g. Instrumentierung besteht die Möglichkeit, in und mit dem Ökokanal unter naturnahen Bedingungen Bilanzversuche durchzuführen sowie neue Sensoren unter definierten Verhältnissen zu testen und weiterzuentwickeln. Die umfangreichen Daten zum Materialtransport bzw. -verbleib sind ferner dazu geeignet, mathematische Modelle über die Wechselwirkungen zwischen Landwirtschaft und Umwelt zu verifizieren.

Der vorliegende Bericht gibt eine Beschreibung des Modellökosystems, der betriebs- und meßtechnischen Instrumentierung sowie Beispiele für den Einsatz. Nach Tabelle 1 sind die Messungen aufgeteilt in Untersuchungen der Makro- und Mikroumgebung sowie dem Verhalten der Pflanzen, wobei die Untersuchungen nicht nur auf die Luft, den Boden und das Wasser, sondern auch auf die Pflanze selbst zielen. Hinsichtlich der Daten der Makroumgebung entstehen höchstens Schwierigkeiten bezüglich der Meßtechnik und ihrer Einsatzfähigkeit durch Anforderungen an Robustheit, der Notwendigkeit der Kalibrierung und der gewünschten Genauigkeit der Systeme. Entscheidender sind die Messungen der Mikroumgebung, die in den meisten Fällen nicht mit konventionellen Mitteln, sondern nur auf indirektem Wege zu bekommen sind. Die Frage nach der meßbaren „Antwort“ einer Pflanze auf Veränderungen in der Umwelt ist eine der interessantesten Fragestellungen (speaking plant concept). Hier gibt es bisher nur erste Ansätze; über ein Beispiel wird im Zusammenhang mit dem Modellökosystem berichtet. Neben der Erfassung der Antwort der Pflanze auf Umweltgegebenheiten ist die Adaption von Sensoren das Hauptziel der Experimente, um damit die Transportvorgänge in und zwischen den Kompartimenten zu messen und Angaben zum Stoffverbleib machen zu können.

Tabelle 1: Beispiele für Messungen um die Pflanze

	Makroumgebung	Mikroumgebung	Pflanzenantwort
Luft	Temperatur rel. Feuchte Windgeschwindigkeit Strahlung	Blattemperatur Taupunkt Austauschrate PAR	Transpiration Photosynthese
Boden/Wasser	Wassermenge Düngermengen	Saugspannung Konzentrationen	Saftfluß Nährstoffaufnahme
Pflanze	Höhe Gewicht	Blattfläche Wurzellänge	Chlorophyllaktivität Turgor

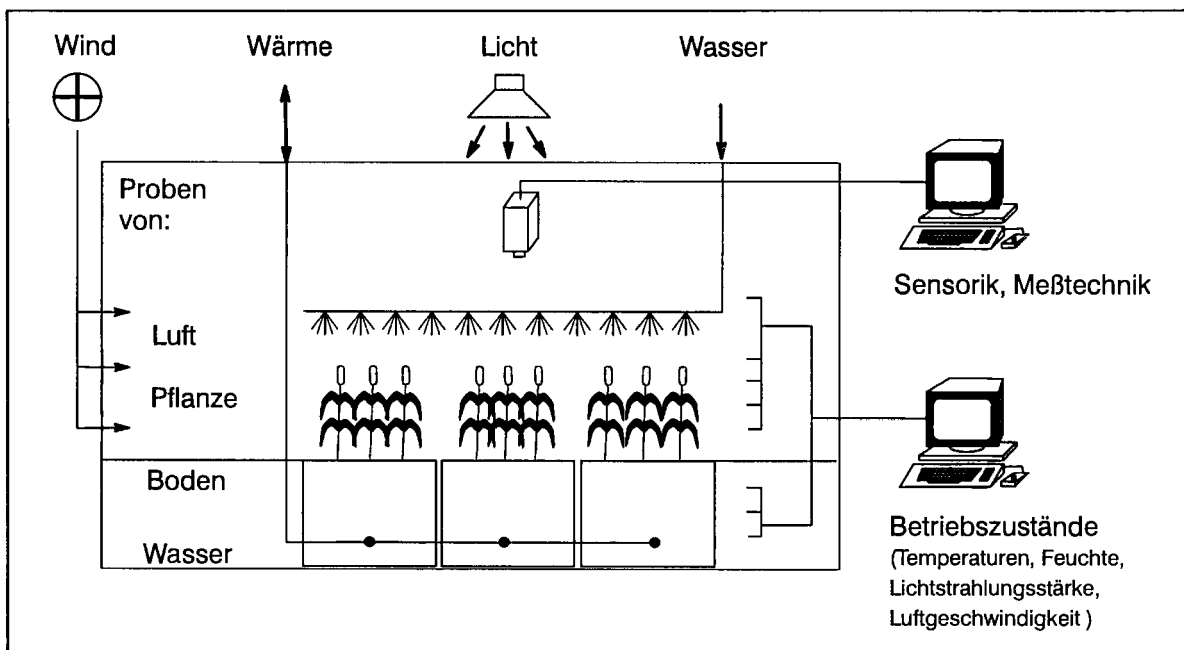


Bild 1: Schema des Modell-Ökosystems

## 2 Das Modellökosystem

Der Windkanal (Bild 1) ist in offener Bauweise, d. h. ohne Strömungsrückführung, gebaut. Ein Axialgebläse mit stufenlos verstellbarem Leitrad erlaubt einen Luftdurchsatz bis zu 66000 m<sup>3</sup>/h entsprechend einer mittleren Windgeschwindigkeit von bis zu 4 m/s. Resultierend aus der offenen Bauweise - Ansaugen und Abblasen der Luft in die freie Umgebung - folgen Temperatur und Feuchte den Umgebungsbedingungen 'Außenluft' oder 'Hallenluft'. Durch entsprechende Lampen aus dem Bereich der Gewächshaustechnik wird das Tageslicht für das Pflanzenwachstum reguliert. Um bezüglich des Bodens natürliche Verhältnisse zu haben, werden gewachsene und ungestörte Bodenkerne gewonnen. Diese Bodenkerne können in speziell ausgebildeten Lysimeterbehältern bis zum Gefrierpunkt gekühlt werden. Zur Applikation von Regen, von Pflanzenschutzmitteln, von Flüssigdünger oder 'Tracermaterial' in Wasser steht eine Spritzeinrichtung zur Verfügung, die bei konstanter Querverteilung mit einem Wagen über definierte Bilanzgebiete gefahren werden kann. Abhängig von der Fahrgeschwindigkeit lassen sich z. B. Regenmengen von Leicht- bis Starkregen simulieren. Alle Parameter werden über einen PC eingestellt und kontrolliert.

### 2.1 Wind

Als einen wesentlichen Unterschied zu den bekannten Untersuchungen mit Lysimetern ist die Berücksichtigung des Windes mit seinem Einfluß auf die Transportvorgänge und das Stoffverhalten an der Bodenoberfläche und zwischen den Kompartimenten Boden, Pflanze und Luft zu sehen. Um die natürlichen Verhältnisse über einer bewachsenen Landfläche richtig darzustellen, ist es erforderlich, eine drallfreie Strömung mit einem parabolischen Höhenprofil der Geschwindigkeit zu erzeugen, das über der Querschnittsbreite des Kanals konstant ist. Die Anordnung des

Kanals in der Experimentierhalle führt zu einer tangentialen Einleitung der Strömung und der Ausbildung einer Drallströmung, wie sie z. B. von Tangentialzyklonen in der Entstaubungs- oder Feuerungstechnik bekannt sind. Um die Anforderung an die Strömung - Drallfreiheit, Parabelprofil, geringe Makroturbulenz - zu erfüllen, wurden strömungsformende Einbauten im Kanaleinlauf vorgenommen. Nach dem Durchströmen eines Röhrengleichrichters mit Widerstandselementen (Filter) wurde eine Strömung nach Bild 2 erreicht, die keine Makroturbulenz aufweist. Durch die Widerstandselemente wird die theoretische mittlere Geschwindigkeit von 4 m/s nur leicht abgesenkt.

### 2.2 Strahlung

Um ein optimales Pflanzenwachstum zu ermöglichen, wurde eine zusätzliche Beleuchtungseinheit mit 16 Lampen von je 250 W Leistung installiert. Die Zusatzbeleuchtung unterstützt die natürliche Beleuchtung, die durch die Glaswände der Experimentierhalle und des Kanals in die Bilanzstrecke gelangt. Das Wellenlängenspektrum der Zusatzbeleuchtung liegt hauptsächlich zwischen 400 nm und 700 nm. Die Beleuchtungskörper stammen aus der Gewächshaustechnik. Die zu stellende Bedingung der gleichmäßigen Ausleuchtung der Bodenfläche mit photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) wird durch die spezielle Anordnung und Ausrichtung der Lampen erreicht. Bild 3 zeigt die resultierende PAR-Verteilung in 0,35 m Höhe über dem Boden des Bilanzgebietes. In der gewählten Abstufung der PAR-Strahlung ist diese als örtlich konstant anzusehen.

### 2.3 Beregnung und Sprayapplikation

Eine weitere Forderung für die Simulation natürlicher Produktionsabläufe mit dem Modellökosystem waren die Applikation von Regen, Agrochemikalien und gegebenenfalls von Tracer-

material mit Wasser als Trägerfluid. Auch hierfür wird eine gleichmäßige ortsunabhängige Dosierung gefordert. Diese wird durch die Düsenanordnung über der Querschnittsfläche hinsichtlich der Querverteilung erreicht. Um dies auch in Längsrichtung zu gewährleisten, wurde die Sprüheinrichtung axial beweglich auf einem Trägerwagen montiert. Durch einen Regelantrieb sind Vorschübe von Stillstand bis 3,4 m/s erreichbar.

Als Regengenerator wurden 2 Regentropfdüsen RD-5 installiert. In Abhängigkeit von Düsendruck und Durchflußrate können verschiedene Regenszenarien vom leichten (konstanten) „Landregen“ bis zum „Platzregen“ erzeugt werden. Für die Applikation von Pflanzenschutzmitteln oder Flüssigdünger kommen 2 Flachstrahldüsen (11.5/120°) zum Einsatz. Die erreichte Gleichförmigkeit der Querverteilung zeigt Bild 4.

## 2.4 Bodeneigenschaften

Das im Windkanal dargestellte Agrarökosystem besteht aus 12 Lysimeterbehältern mit jeweils 90 l ungestörtem Bodeninhalt. Um wirklichkeitsnahe Wachstumsverhältnisse wie auf dem Feld zu simulieren, mußte der Boden auch in den Behältern gekühlt werden. Im Bild 5 ist eine schematische Darstellung eines Lysimeterbehälters enthalten. Zwei getrennte Kammern an der Seite und eine im Boden werden von Wasser durchströmt als Kühler genutzt. Bodentemperaturen von nahe 0 °C bis 20 °C sind so mit akzeptablen Übergangszeiten erreichbar, denn die Bodentemperatur sollte der natürlichen Dynamik auf dem Feld angepaßt sein. Bild 5 zeigt für eine Meßstellenanordnung (Wasser/Boden) die Sprungantwort des Bodens. Das System folgt einer plötzlichen Temperaturabsenkung mit einer Verzögerungszeit von ca. 7 Stunden.

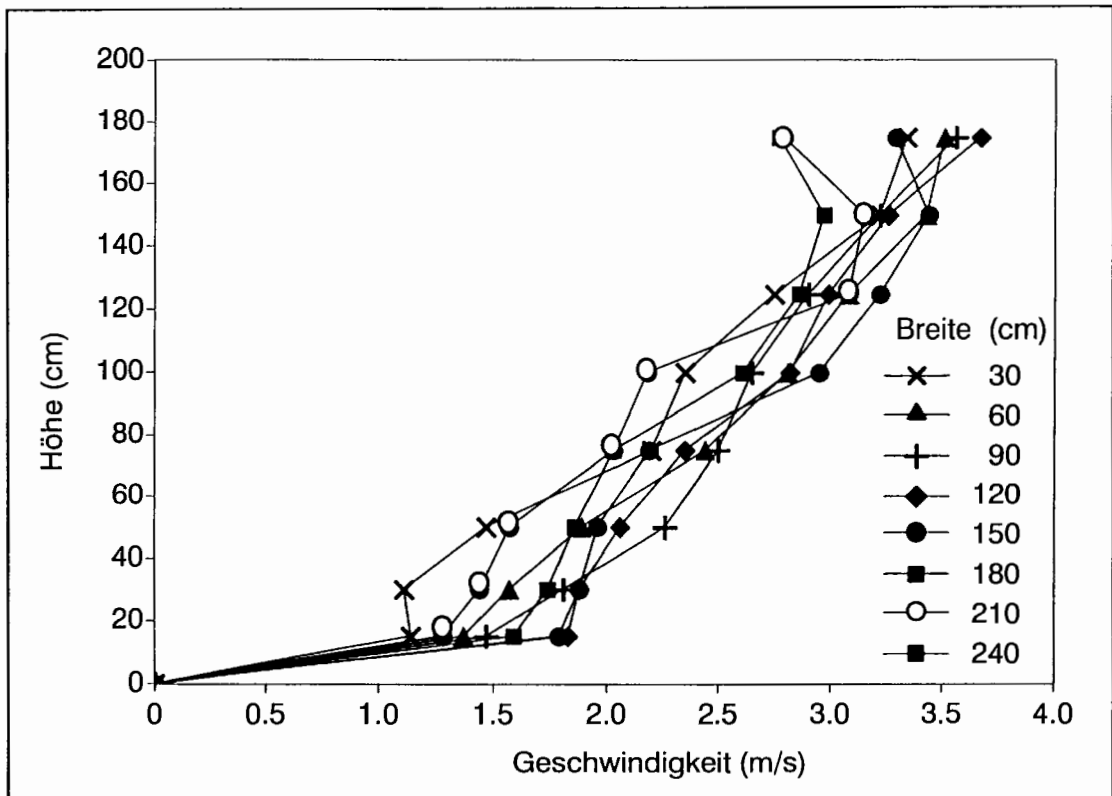


Bild 2: Windgeschwindigkeit in der Meßebe

## 3 Meßtechnik

### 3.1 Datenerfassung und Betriebstechnik

Zur Erfassung der Grunddaten wie Windgeschwindigkeit, Temperatur, Feuchte und Strahlung werden bekannte Standardmeßverfahren eingesetzt. Alle anfallenden Daten werden über ein spezielles Interface (Datenlogger) zu einem angepaßten Datenverwaltungssystem (PC) geführt. Dieses System kann auch zur Regelung der Regen- und Chemikalienapplikation genutzt werden.

Alle Daten werden über einen Mikroprozessor-gesteuerten Datenlogger mit 80 analogen Eingängen (10 Bit Auflösung), 96 Pt 100 Ports, 64 Kanälen für digitale Variable und 32 Impuls-Eingängen für zu messende Frequenzen aufgenommen. Die Meßwerte werden entweder direkt über die serielle Schnittstelle zum PC transferiert oder im Datenlogger aufintegriert. Hier können die Daten in 5 Gruppen mit unterschiedlichen Zeitintervallen für frei konfigurierbare Eingänge integriert werden. Alle Daten werden mit der Zeit verknüpft und entsprechend ihrer Gruppe abgelegt. Die gesammelten Daten können dann für die weitere Auswertung an beliebige PCs übergeben werden. Das parametrische Setup des ganzen Interfaces wird ebenso mit dem PC und einem interaktiven Mensch-Maschine-Dialogsystem erledigt.

### 3.2 Analytik und Sensoren

Das Modellökosystem bietet wegen der einstellbaren Bedingungen die Möglichkeit, neue Meßtechniken zu entwickeln

und zu testen, sie aus anderen Aufgabengebieten den Anforderungen der Agrartechnik anzupassen und/oder Experimente zu ihrer Kalibrierung durchzuführen. Dies gilt für einfache Sensoren ebenso wie für komplizierte Meßtechniken. Stoffkonzentrationen an verschiedenen Meßorten und Zeitpunkten können z. B. nach Probenahme mit hoher Genauigkeit mittels HPLC oder GC ausgeführt werden. Es ist hierbei zu beachten, daß die Probenahme das Ergebnis u. U. stark beeinflussen kann.

Kontinuierliche Messungen der Schadstoffkonzentration in der Luft z.B. von  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  etc. können mittels eines photoakustischen Meßverfahrens einfach und schnell oder aber genauer mit der FTIR-Technik durchgeführt werden. Hiermit ist jedoch ein deutlich höherer Aufwand verbunden, so daß häufig - abhängig von der Fragestellung - der Einsatz des einfacheren Meßsystems ausreicht, soweit dies sorgfältig z. B. mit der FTIR kalibriert wurde.

Ein wichtiger Punkt in der Agrartechnik ist die Entwicklung kostengünstiger, schnell und berührungslos arbeitender Meßsysteme, die auch unter normalen Feldbedingungen einsetzbar sind. Bildanalyse-systeme bieten hier große Spielräume. Deshalb wird diese Technik ebenfalls im Ökoka-nal getestet, um Zustände von Boden, Pflanzenteilen und Pflanzengesellschaften nach Form und Farbe zu vermessen. Die benutzten Kameras arbeiten im sichtbaren Wellenlängenbereich oder bis ins nahe Infrarot (NIR Bereich) bis zu einer Wellenlänge von 950 nm. Weitere berührungslose 'physikalische' Meß-techniken mit Entwicklungspotential sind Temperaturmes-sungen und Radarmessungen.

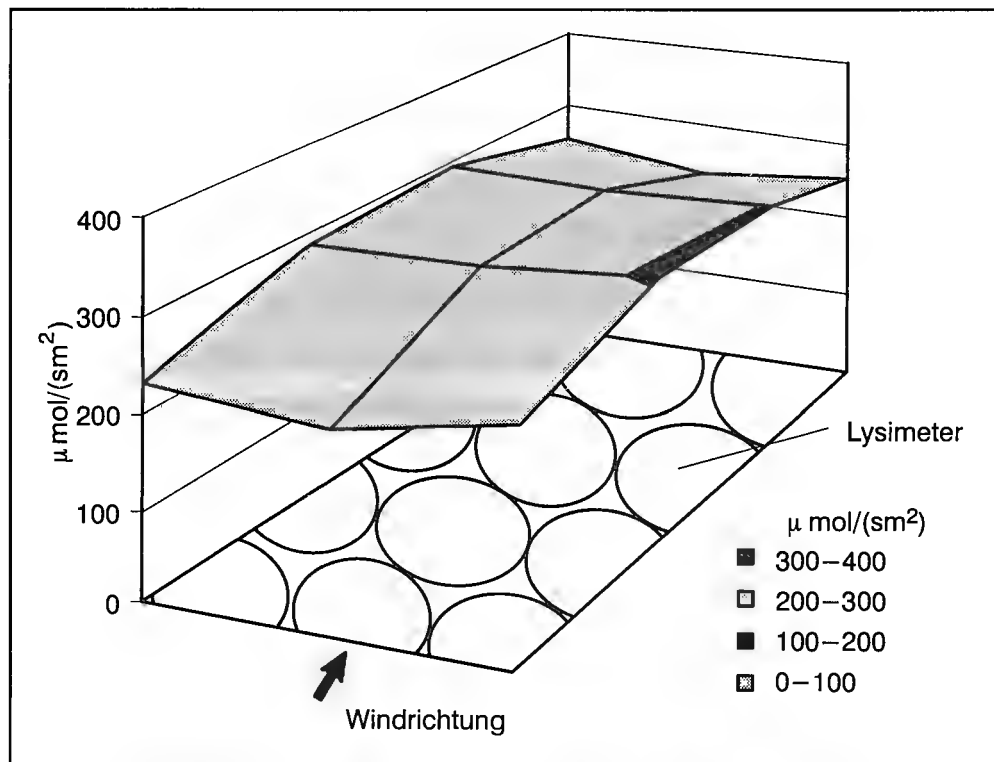


Bild 3: Verteilung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) im Meßfeld

#### 4 Beispielhafte Ergebnisse

Das geschaffene Modellökosystem ermöglicht Untersuchungen, die ein großes Spektrum der Wechselwirkungen zwischen Landwirtschaft und Umwelt abdecken können. Im folgenden wer-

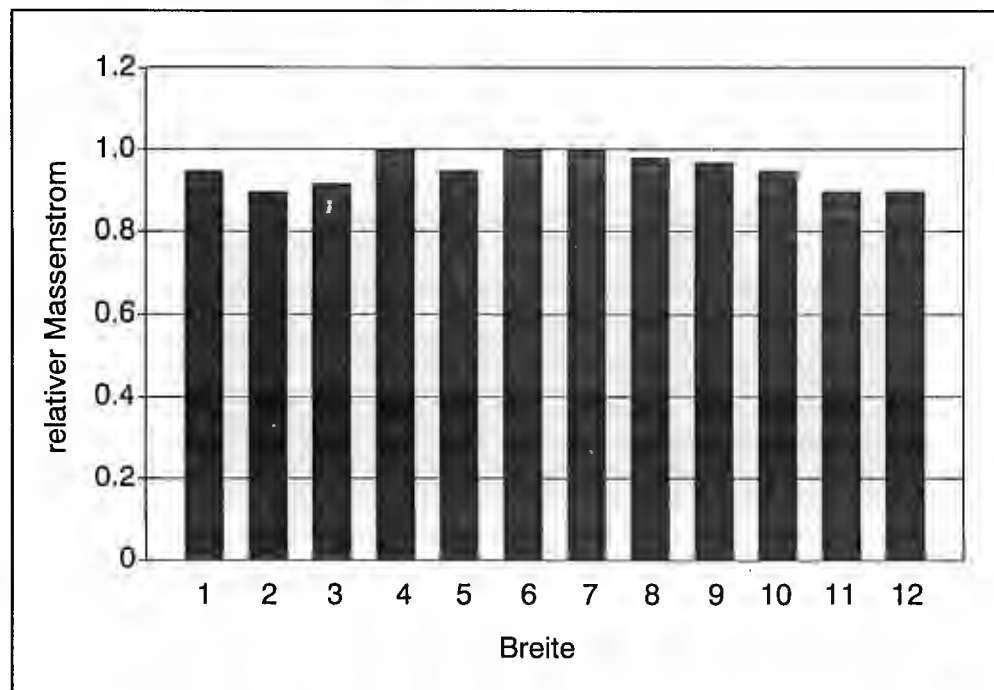


Bild 4: Querverteilung der Pflanzenschutzspritze

2 Düsen im Abstand von 1,28 m (symm. angeordnet), Druck 2,5 bar, Durchfluß 2,8 l/min

den beispielhaft erste Ergebnisse vorgestellt, die die Nützlichkeit des Modellökosystems zum Simulieren landwirtschaftlicher Fragestellungen darlegen. Die Ergebnisse beleuchten die Bandbreite der Antworten in den Kompartimenten 'Luft, Boden, Pflanze und Wasser'.

#### 4.1 Boden: Test neuer Feuchte-Sensoren

Für das Pflanzenwachstum und die Wasseraufnahme ist die Saugspannung im Boden entscheidend, während für den Transport von z. B. Chemikalien durch die Bodenmatrix der Wassergehalt des Bodens der wichtigere Parameter ist. Wegen der Komplexität der Zusammenhänge und der großen Variabilität der Bodenparameter ist die Messung beider Größen nicht ohne Schwierigkeiten möglich. Die Tensiometertechnik ist der klassische Ansatz für die Saugspannung, aber sehr empfindlich und wartungsintensiv im Vergleich zu elektronischen Sensoren. Meßeinrichtungen für die Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes zeichnen sich durch eine gro-

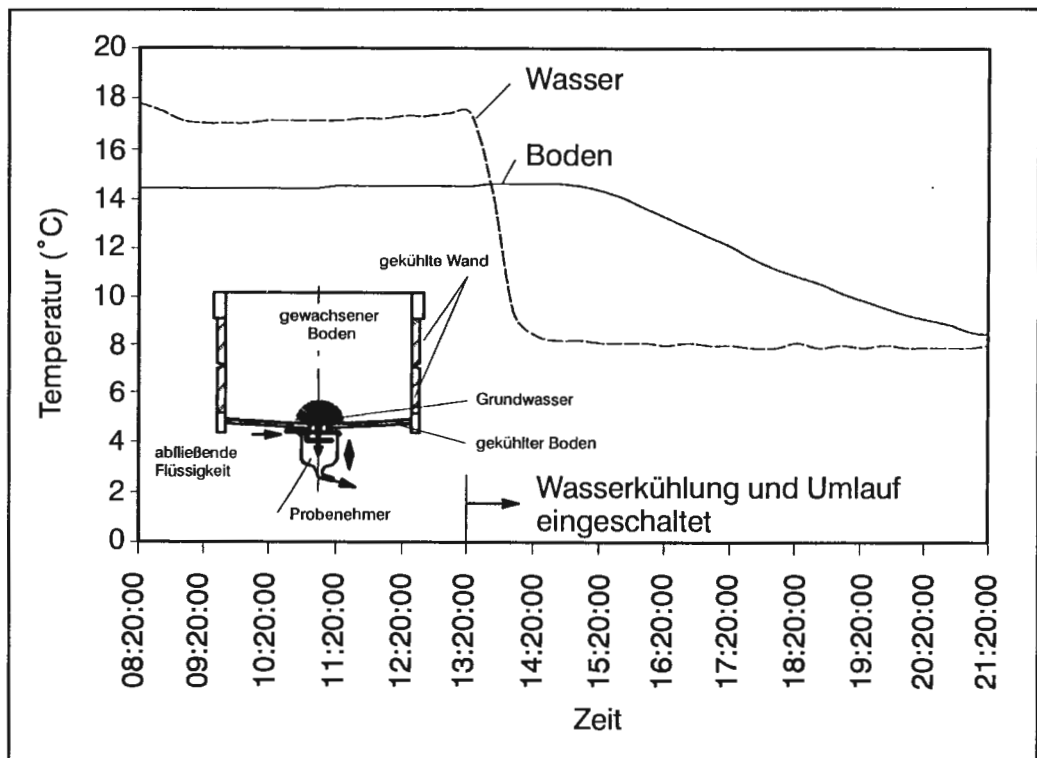


Bild 5: Lysimeter-Behälter und Temperaturverlauf bei Kühlung (Sprungantwort)

ße Robustheit aus. Bild 6 zeigt den Vergleich beider Techniken mit einer bedeutenden Hysterese bei der Messung der Saugspannung. Die Weiterentwicklung eines robusten, volumetrisch messenden, aber über definierte Materialien tensiometrisch anzeigenden Gerätes ist deshalb Forschungsschwerpunkt.

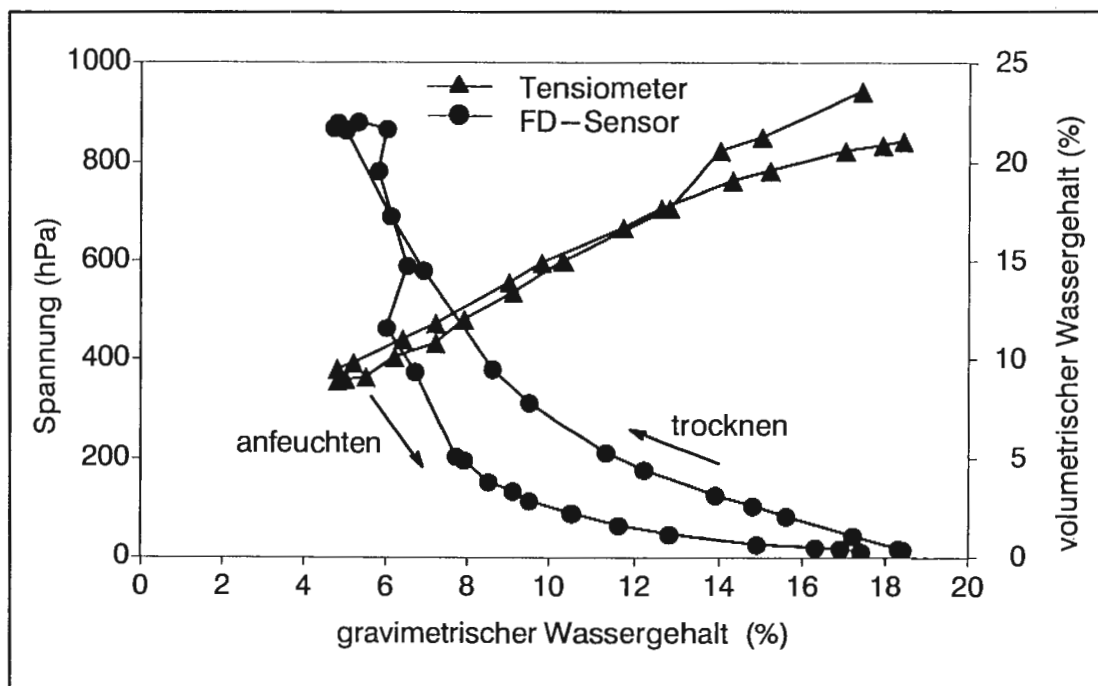


Bild 6: Hysterese der Saugspannung im Vergleich zum volumetrischen Wasserhehalt

#### 4.2 Pflanze: Stickstoff-Applikation und Bildverarbeitung

Die Reflexion sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarotes eignet sich zur Beschreibung von Pflanzenwachstumscharakteristika und z. B. dem Einfluß von Stickstoffgaben. Bild 7 zeigt die Abhängigkeit der Lichtreflexion von der Stickstoffgabe und der Wellenlänge des Lichtes. Besonders ab Wellenlängen jenseits von 700 nm lassen sich unterschiedliche Stickstoffinputs voneinander

trennen. Als ein praktisches Beispiel sind in Bild 8 die Variationen der optischen Indizes für den Grüneindruck, für eine normierte Infrarotreflexion sowie der herkömmlich gemessenen Blattfläche als Funktion der Stickstoffgabe gegeben.

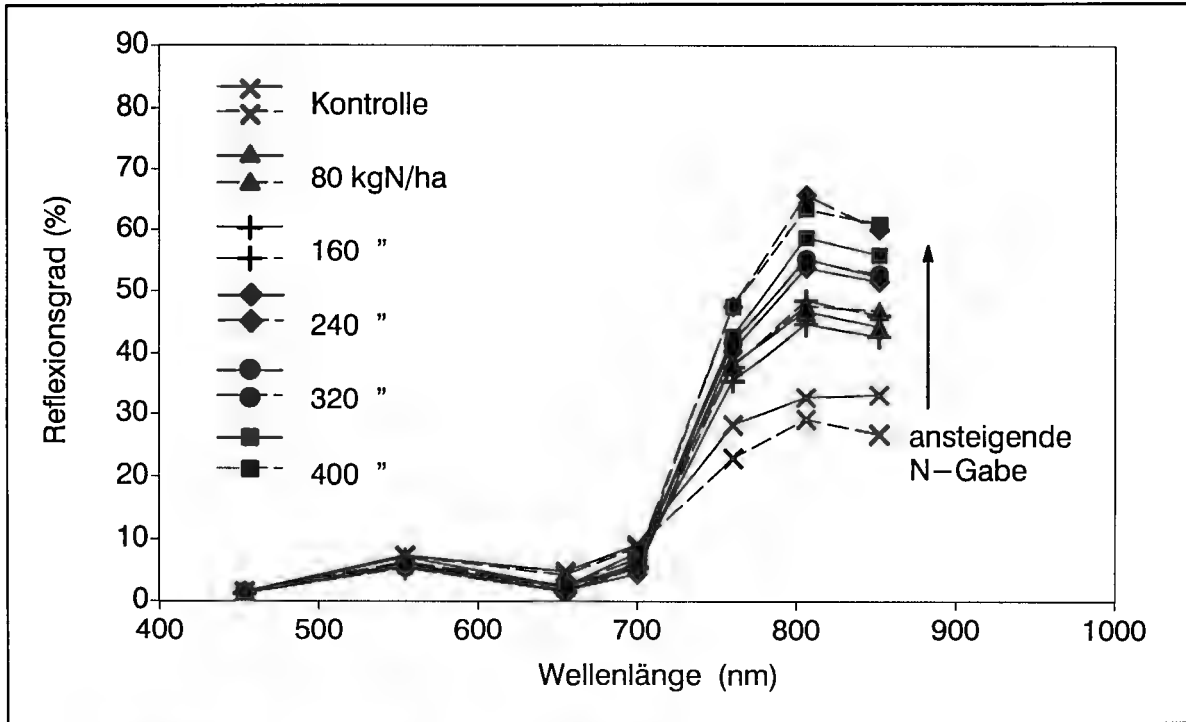


Bild 7: Reflexionsgrad in Abhängigkeit von der Stickstoffgabe

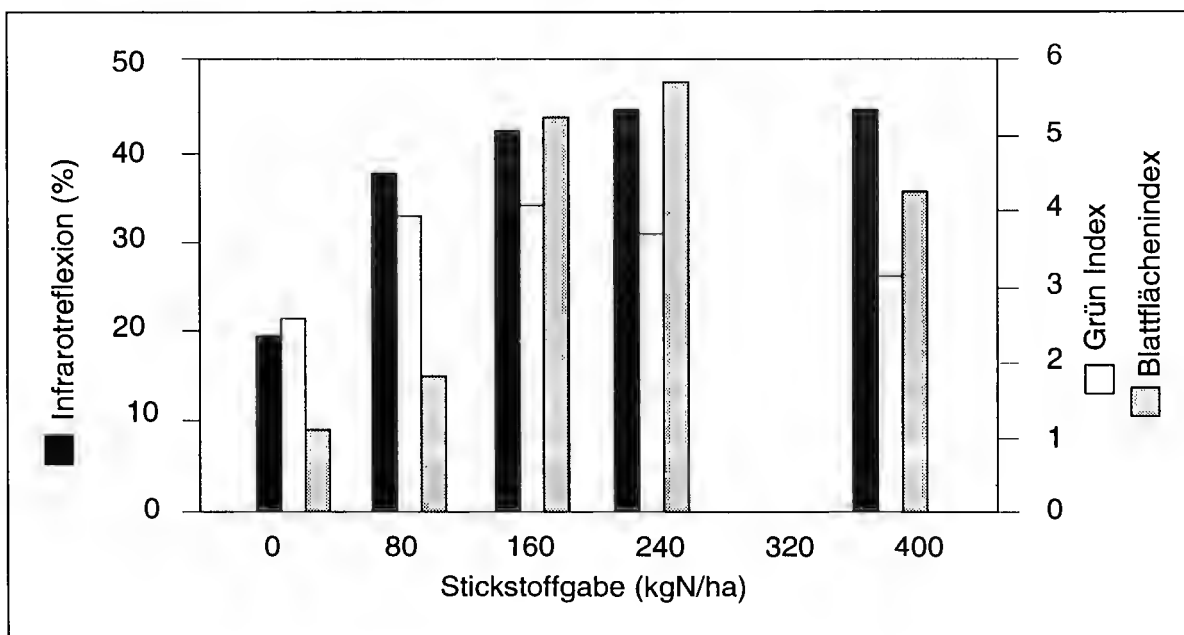


Bild 8: Optische Indizes für verschiedene Stickstoffgaben

#### 4.3 Luft: Ammoniak-Emission nach Gülleausbringung

Hauptsächlich wurde der Ökkanal als Instrumentarium zur Erfassung der Transportvorgänge und des Stoffverbleibs innerhalb und zwischen den einzelnen Umweltkompartimenten geschaffen, wobei Substanzen Betrachtung finden, die im Hinblick auf Landwirtschaft und Umwelt als Emissionen und Immissionen von Relevanz sind. Ein Beispiel ist die Freisetzung gasförmigen Ammoniaks vom Ackerland nach der Ausbringung von Gülle.

Bild 9 beschreibt den Konzentrationsverlauf gasförmigen Ammoniaks in Höhen von 0,3 m und 1 m über dem Boden als Funktion der Zeit unmittelbar nach der Applikation. Während der Ausbringung der Gülle betrug die Windgeschwindigkeit in 1 m Höhe 0 m/s, danach 1 m/s. Als Meßgerät kam ein opto-akustisches Meßverfahren zum Einsatz, das vorher entsprechend auf Ammoniak kalibriert wurde [3, 4]. Während in 0,3 m Höhe ein Anstieg auf max. 1,6 ppm mit anschließendem Abfall zu beobachten ist, kommt es in 1 m Höhe kaum zu einer erhöhten Ammoniakkonzentration. Dies bedeutet, daß die Ammoniakfahne durch den Wind bodennah gehalten wird.

#### 4.4 Wasser: Nitrat auswaschung nach Düngung

Der Gehalt an gelösten Ionen im Sickerwasser des Bodens bildet sich in der Leitfähigkeit ab. Neue Meßtechniken zur Erfassung der Dielektrizitätseigenschaften von Substanzen bieten neben der Verrechnung des Realteils zum Wassergehalt des Bodens auch die Umrechnung des Imaginärteils in die Leitfähigkeit. Der grundsätzliche Zusammenhang mit Düngung und möglicher Auswaschung ist in Bild 10 gegeben. Erstmalig stehen so robuste

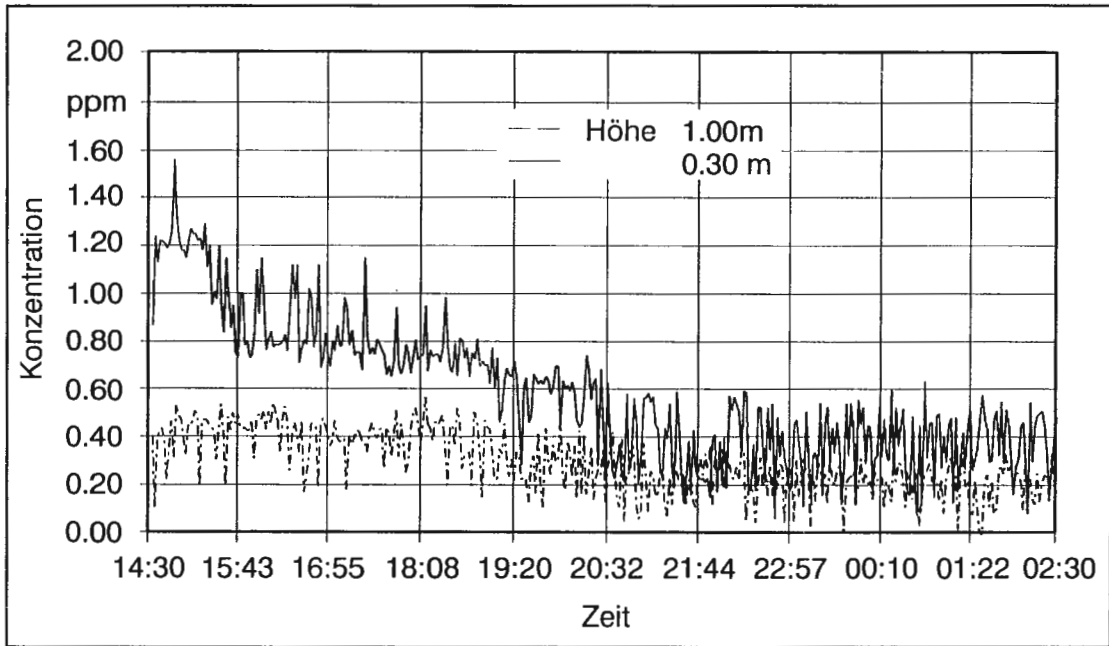


Bild 9: Zeitverlauf der Ammoniakkonzentration im Modellökosystem nach der Applikation von Schweinegülle; Windgeschwindigkeit von 1 m/s in 1 m Höhe

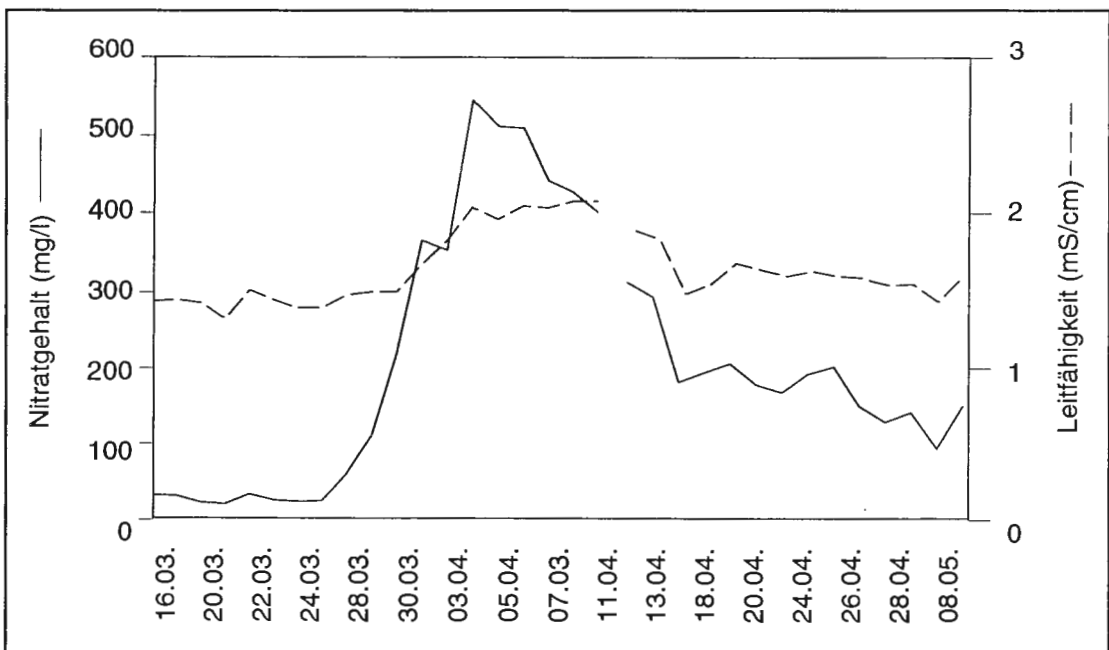


Bild 10: Verlauf von Nitratgehalt und Leitfähigkeit im Sickerwasser

Sensoren für Fragestellungen zur Verfügung, die sonst nur über aufwendige Probenahme zu beantworten sind.

Zusammen mit entsprechenden Modellen [5] lassen sich so feldtaugliche Strategien zur Überwachung und Minderung von Stoffausträgen entwickeln.

### Zusammenfassung

Ein Modellökosystem bestehend aus einem Windkanal mit integriertem Lysimetersystem und einstellbaren Umweltbedingungen ermöglicht es, Faktoren der Umwelt und des Pflanzenwachstums kontrolliert einzustellen und zu steuern. Dies betrifft insbesondere die Größen Windgeschwindigkeit, Strahlung, Regen und Bodentemperatur. Die Hauptaufgaben für dieses Instrumentarium sind die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Umwelt, z. B. der Transportvorgänge und der Prozesse des Stoffverbleibs in Agrar-Ökosystemen. Durch Bilanzierungsansätze wird das Gesamtsystem Luft, Boden, Wasser und Pflanze betrachtet, um so zu einer besseren Abschätzung der Parameter und Modellvorstellungen zu kommen, die die Umweltauswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion beschreiben. Zusätzlich dient das Modellökosystem der Entwicklung, Erprobung und Kalibrierung umweltrelevanter Meßtechniken, wie im Beispiel der Messung von Boden- und Pflanzenzuständen.

### A model ecosystem for assessment of interactions between plant production and environment

To assess possible environmental loads by necessary agricultural inputs reproducible investigations are needed. Field measurements on the fate and the transfer of agrochemicals are difficult to perform under the strongly varying natural conditions. Therefore, a model ecosystem was created with lysimeter containers in a wind tunnel to have controlled parameters like wind, radiation, rain and soil temperature. Besides of experiments on the transfer and decay processes in agro-ecosystems the well controlled environment of the model ecosystem is also suited for testing, improving, and calibrating sensors. So measuring environmental loads, developing new sensor systems and verifying models is the three fold objective of the model ecosystem.

### Literatur

- [1] Hinz, T.; Kraft, M.; Munack, A.; W.; Paul, W.; Witte; E.: A model ecosystem as a hosts for risk assesment of materials inputs in plant production. - CIGR/ AGENG'94; paper no. N94-B-020, Milano 1994.
- [2] Kraft, M.; Weigel, H.-J.; Mejer, G.-J.; Brandes, F.: Reflectance measurements of leaves for detecting visible and non-visible ozone damage to crops. - Journal of Plant Physiology, Vol. 48, S. 148-154, 1996.
- [3] Hinz, T.; Krahl, J.; Linke, S.: Calibration procedure and ammonia measurements in livestock enterprises. - In: National Environmental Technology Centre Culham (Ed.): International Conference on Atmospheric Ammonia: Emissions, Depositions and Environmental Impact, Abingdon, 1995.
- [4] Krahl, J.; Hinz, T.; Schröder, O.; Luther, W.; Munack, A.: High performance selective measurement of ammonia and greenhouse gases by FTIR spectroscopy. - In: National Environmental Technology Centre Culham (Ed.): International Conference on Atmospheric Ammonia: Emissions, Depositions and Environmental Impact, Abingdon, 1995.
- [5] Paul, W.; Witte, E.: Robust approaches to N-leaching under uncertainties. - Mathematics and computers in Simulation 42 (1996), S. 153-157.

Verfasser: Hinz, Torsten, Dr.-Ing.; Speckmann, Hermann Dipl.-Ing.; Paul, Wolfgang, Dr.-Ing.; Institut für Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Leiter: Prof. Dr.-Ing. Axel Munack.