

# Schadgas geregelte Lüftungstechnik für Mastschweine

Walter Grotz, Barbara Rathmer, Andreas Gronauer und Hans Schön  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik Weihenstephan, Freising-Weihenstephan

*In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung ist ein gutes Stallklima die Grundlage für gesunde Tiere und Menschen, die sich im Stall aufhalten. Der Gesetzgeber trägt diesem Rechnung indem er in den Kälber- und Schweinehaltungsverordnungen Höchstgrenzen für bestimmte Schadgase, u. a. Ammoniak (NH<sub>3</sub>) festgelegt hat. An der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik wurde in Zusammenarbeit mit Lüftungstechnikfirmen eine schadgasgeregelte Lüftung mit NH<sub>3</sub> als zusätzlicher Regelgröße neben der Temperatur entwickelt und in einem Mastschweinestall erfolgreich erprobt. Einfache NH<sub>3</sub>-Sensoren, die im Rahmen des Projektes im Labor an einer Gasmischstation und in Praxisversuchen im Stall getestet wurden, scheinen derzeit noch nicht geeignet langfristig und zuverlässig in einer schadgasgeregelten Lüftung eingesetzt werden zu können.*

## Schlüsselwörter

Ammoniak, Regelung, Lüftungstechnik, Sensoren

## Einleitung und Problemstellung

Auch wenn hohe Schadgaskonzentrationen im Stall nicht zwangsläufig zu Leistungseinbußen führen, so ist aus Gründen der Tiergerechtigkeit und –gesundheit auf eine möglichst gute Gestaltung des Stallklimas zu achten. Nicht zuletzt ist auch der im Stall arbeitende Mensch an möglichst geringen Schadstoffkonzentrationen interessiert, die jedoch besonders bei geringen Lüftungsraten, also in den Übergangszeiten und den Wintermonaten besonders hoch sind. Durch gesetzliche Regelungen [1], [2] sind die Höchstwerte der Schadgaskonzentrationen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) festgelegt, die im Tierbereich nicht überschritten werden sollen. Eine Orientierung zur Dimensionierung von Lüftungsanlagen in geschlossenen Ställen gibt die DIN 18910 [3]. Dort sind Mindestluftstraten für den Winter- und den Sommerbetrieb in Abhängigkeit von Tierart und Tiergewicht festgelegt. Als Berechnungsgrundlage dienen hierbei die Wasser- bzw. Kohlendioxidbilanz. Aufgrund der komplexen Bildungsprozesse von Luftverunreinigungen, die v. a. aus der Zersetzung der Exkremente stammen, kann bei der Dimensionierung der Lüftung nach DIN 18910 allerdings nicht gewährleistet werden, dass die in [1] und [2] festgelegten Grenzwerte für alle Gase eingehalten werden. Aus

diesem Grund ist es nötig, eine Lüftungsregelung zu entwickeln, die zumindest die Konzentration eines dieser Schadgase als Regelgröße enthält. An der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München wurde eine derartige Regelung in Zusammenarbeit mit den Firmen Ziehl-Abegg und Schönhammer Lüftungstechnik entwickelt. Neben der Temperatur wurde Ammoniak (NH<sub>3</sub>) als zusätzliche Regelgröße integriert. NH<sub>3</sub> wurde gewählt, da es seine Schädwirkung schon bei relativ geringen Konzentrationen entfaltet. Deshalb kann es besser zur qualitativen Beurteilung des Stallklimas herangezogen werden als CO<sub>2</sub>, das auch dann keine unmittelbare Schädwirkung auslöst, wenn die Konzentration mehrfach über dem Grenzwert von 3000 ppm liegt.

## Aufbau einer schadgasgeregelten Lüftung

Der grundsätzliche Aufbau einer schadgasgeregelten Lüftung wurde bereits in Landtechnik [4] beschrieben. Eine schadgasgeregelte Lüftung besteht aus einer Prozessregelung, die einen Soll-Ist-Abgleich zwischen voreingestellten Werten der Regelgrößen Temperatur und NH<sub>3</sub> und den aktuell von den spezifischen Sensoren gemessenen Werten durchführt. Daraus werden die Stellwerte für die Aktoren Ventilator und Heizung errechnet.

## Sensorik

Bei der Sensorik müssen kostengünstige und dennoch zuverlässige NH<sub>3</sub>-Sensoren eingesetzt werden. Im Robustbereich Stall fehlt bisher für die kontinuierliche Erfassung und Überwachung der Schadgaskonzentrationen die geeignete Sensorik, da die auf dem Markt befindlichen Systeme für den Einsatz in industriellen Anwendungen konzipiert sind. Deshalb wurden innerhalb des Forschungsprojekts auch verschiedene Einfachsensoren für die schadgasgeregelte Lüftungstechnik getestet [4]. Diese in **Tabelle 1** im Überblick dargestellten Sensoren wurden im Labor und in der Praxis überprüft, wobei die Praxisüberprüfung in Phasen im kontinuierlichen und Phasen im intermittierenden Betrieb unterteilt wurde. Die Qualität eines Messverfahrens lässt sich nach VDI - Richtlinie 2449 [5] bestimmen. Wichtig hierbei ist die Selektivität, die „die Abhängigkeit des Messwertes von der Anwesenheit anderer als dem gesuchten Luftbeschaffenheitsmerkmal“ beschreibt, also die Querempfindlichkeit. Querempfindlichkeiten sind nur im Labor festzustellen, da bei Praxisversuchen auch andere Substanzen, die nicht in definierten Konzentrationen im Labor zudosiert werden können, vorhanden sind.

## Anforderungen an die Sensorik

Für den Einsatz in einer schadgasgeregelten Lüftung sind Messungenauigkeiten von max. 5 ppm bei NH<sub>3</sub>-Konzentrationen bis 30 ppm zu fordern, bei höheren Konzentrationen sollte die Messungenauigkeit ca. 20 % des angezeigten Wertes nicht überschreiten. Neben geringen Investitionskosten, sollten die NH<sub>3</sub>-Sensoren langzeitstabil sein, um Wartungskosten gering zu halten und die optimale Betriebssicherheit zu gewährleisten.

## Material und Methoden

### Regelungsprozess

Da NH<sub>3</sub> als zweite Regelgröße neben der Temperatur in den Regelungsprozess integriert wird, muss der bisherige Regelungsprozess angepasst werden. Wenn die Zulufttemperatur weit unter der Solltem-

peratur im Stall liegt, kann die  $\text{NH}_3$ -Konzentration nicht beliebig abgesenkt werden, da in diesem Fall die Solltemperatur nicht mehr eingehalten werden könnte. Um trotzdem niedrigere  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen als in einem temperaturgeregelten Vergleichsstall zu erreichen, ist eine stufenlose Heizung erforderlich. In der Regelungssoftware wurde die  $\text{NH}_3$ -Konzentration als Eingangsgröße und die Heizleistung als Ausgangsgröße integriert. Auf der linken Seite des **Bildes 1** ist dargestellt wie sich der Stellwert der Lüftung aus der  $\text{NH}_3$ -Regelung zusammensetzt. Bei Überschreitung der Solltemperatur wird  $\text{NH}_3$  weniger gewichtet, da dann der Abtransport von Wärme Vorrang hat. Bei Unterschreitung der Solltemperatur wird  $\text{NH}_3$  ebenfalls kontinuierlich weniger gewichtet, bis die maximale Heizleistung erreicht ist. Im rechten Teil des Bildes ist dargestellt, wie die Stellgrößen Heizspannung und Ventilator-drehzahl bei Über- bzw. Unterschreitung des Temperatursollwertes kontinuierlich bis zum Maximum (10 V, bzw. 100 %) am oberen und unteren Ende des Regelbereiches geführt werden.

### Sensoren und Messgeräte

Das Hauptaugenmerk lag im ersten Projektabschnitt auf der Auswahl geeigneter Ammoniakensoren. Zunächst wurden hierzu Sensoren nach den Kriterien Preis und Funktionsprinzip für eingehende Untersuchungen ausgewählt. Die Investitionskosten stellen in Kombination mit der Standzeit die wesentliche Hemmschwelle für die landwirtschaftliche Praxis dar. Eine Auswahl nach dem Funktionsprinzip ist nötig, da z. B. elektrochemische Sensoren von vielen Firmen angeboten werden, diese sich aber meist nur durch die Auswertelektronik voneinander unterscheiden.

Im Labor werden die Sensoren so weit nötig bzw. möglich kalibriert. Einige Sen-

soren werden unkalibriert geliefert, andere können aus technischen Gründen nicht kalibriert werden und werden daher mit einer fixen Firmeneinstellung betrieben. Messungenauigkeiten und Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen können am Gaserzeugungs- und -mischungssystem GEMS2000 bestimmt werden. In der Praxiserprobung werden die Nullpunktdrift und die Abweichungen der Sensormesswerte von den Konzentrationen der Referenzmessgeräte unter den speziellen Bedingungen der Stallatmosphäre ermittelt. Nachfolgend werden die in [4] noch nicht beschriebenen, getesteten Sensoren und Messgeräte kurz beschrieben.

### Referenzmessgeräte

Im kontinuierlichen Betrieb wurde ein Photoakustisches Infrarot Spektrometer (PAS-IR) als Referenzmessgerät eingesetzt, da mit diesem Gerät gute Erfahrungen in Laboruntersuchungen und in Praxismessungen [6] gemacht wurden und sowohl das Messprinzip, als auch die Elektronik zuverlässig sind.

Im intermittierenden Betrieb diente ein Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (FTIR-S) als Vergleichsgerät [7], da in einem anderen Teilabschnitt des Projektes eine Multigasanalyse nötig war. In diesem Zeitraum wurde das PAS-IR als  $\text{NH}_3$ -Sensor in der  $\text{NH}_3$ -geregelten Lüftung eingesetzt.

### PAS-MGU

Bei diesem Gerät handelt es sich ebenso wie beim Referenzmessgerät PAS-IR I um ein nach dem Prinzip der PAS-IR funktionierendes Ammoniakmessgerät. Im Unterschied zum Referenzmessgerät ist in dieses Gerät eine Messstellenum-schaltung integriert, die Probegas von vier unterschiedlichen Messpunkten ansaugt und je nach Ventilstellung der Messkammer zuführt oder über einen Bypass der Messgasentsorgung zuleitet. Die-

ses Gerät wurde getestet, da mit ihm mehrere Abteile beprobt werden können.

### Optisch-chemischer Sensor I (OC I)

Das optisch-chemische Funktionsprinzip beruht auf der Absorption von Licht durch eine ammoniak-sensitive Schicht, die bei wechselnder Ammoniakkonzentration die Farbe ändert. Von einer Leuchtdiode (LED) wird ein Lichtstrahl durch das Sensorsubstrat (S) gesandt, der je nach Ammoniakkonzentration unterschiedlich stark gebrochen wird. Nach der Passage des Substrats wird der Lichtstrahl an einem Phototransistor aufgefangen und im Microcontroller mit einem ungebrochenen Referenzstrahl verglichen. Dieses Funktionsprinzip ist in **Bild 2** dargestellt.

### Optisch-chemischer Sensor II (OC II)

Dieser Sensor funktioniert ähnlich wie der optisch-chemische Sensor I (OC I). Durch einen planaren Wellenleiter, in diesem Fall eine Glasplatte, wird ein Lichtstrahl geleitet, der innerhalb des kritischen Winkels einfällt und somit total reflektiert. An der Außenseite ist der Leiter mit einer  $\text{NH}_3$ -sensitiven Schicht versehen, die auf  $\text{NH}_3$ -Konzentrationsänderung mit Farbänderung reagiert. An den Punkten an denen der Lichtstrahl reflektiert wird, tritt eine evaneszente Welle aus dem Wellenleiter. Je nach Färbung der Oberfläche ist diese unterschiedlich stark und somit ein Maß für die  $\text{NH}_3$ -Konzentration.

Zusammenfassend sind die untersuchten Sensoren mit ihren Funktionsprinzipien und Investitionskosten in **Tabelle 1** dargestellt.

### Überprüfungsmodus und Versuchsaufbau

Die Laborüberprüfung der Sensoren und Messgeräte erfolgt an der Gaserzeugungs- und -mischungseinheit GEMS2000. Hier können Einzelgase und Gasgemische in variablen Konzentrationen hergestellt

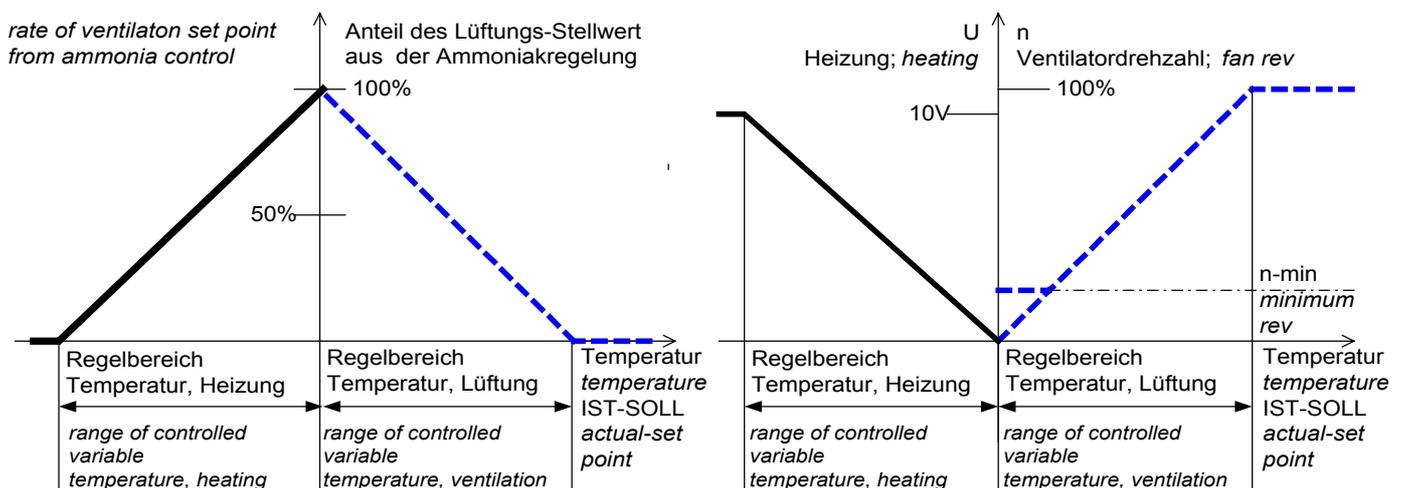


Bild 1: Regelungsprozess bei ammoniakgeregelter Lüftung (Quelle: Ziehl-Abegg)

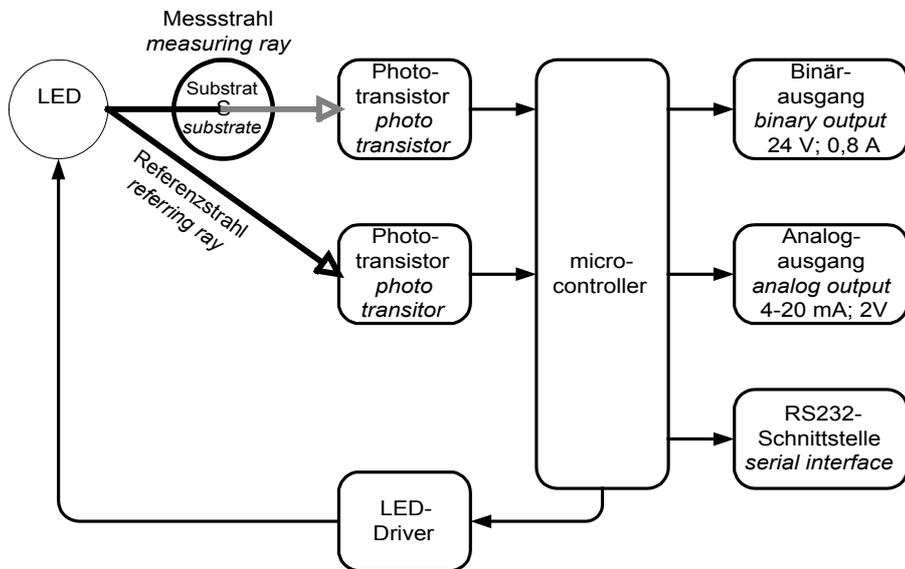


Bild 2: Aufbau des optisch-chemischen Sensors I (OC I) (nach iRAS GmbH)

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Ammoniakensensoren

| Sensor    | Funktionsprinzip                             | Kosten (ca.) | Funktionsweise   |
|-----------|--|--------------|--|
| Referenz  | PAS-IR                                       | 14.000,-     | Infrarotes Licht bestimmter Wellenlänge trifft in Messzelle auf Gas, das sich durch Absorption erwärmt und ausdehnt. Druckveränderung wird mit Messmikrofon aufgenommen. |
| PAS (MGU) | PAS-IR                                       | 10.000,-     |  |
| MOS I     | Widerstandsänderung auf Halbleiteroberfläche | 500,-        | Messgas setzt sich an Halbleiteroberfläche fest und ändert dadurch dessen Leitfähigkeit.   |
| MOS II    |  | 1.000,-      |  |
| OC I      | Optisch-chemisch                             | 1.000,-      | Lichtstrahl durchdringt Substanz, die mit Messgas reagiert und optische Eigenschaften ändert. Änderung des Lichtsignals wird gemessen.                                   |
| OC II     | Optisch-chemisch                             | 1800,-       |  |
| ECS I     | elektrochemisch                              | 3.500,-      | Zu messendes Gas reagiert mit Elektrolyt oder Elektrode, wodurch sich elektr. Potential ändert.  |
| ECS II    | elektrochemisch                              | 3.000,-      |  |

werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Feuchte über ein Kapillarsystem in definierten Konzentrationen zuzudosieren. Dies ist deshalb wichtig, da viele Messgeräte hohe Querempfindlichkeiten zu Wasserdampf aufweisen und die Stallluft i. d. R. hohe und schwankende H<sub>2</sub>O-Konzentrationen aufweist. Unter kontrollierten Bedingungen werden die Sensoren kalibriert, Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen wie z. B. Methan und Wasser definiert und die Messgenauigkeit festgestellt. Am Gasausgang der GEMS2000 werden die zu überprüfenden Sensoren angeschlossen und je nach Bauart aktiv oder passiv mit dem Prüfgas(-gemisch) beaufschlagt.

In der Praxis wurden Versuche im kontinuierlichen Betrieb (achtwöchige Dauer-messung im Herbst, Phase I) und im intermittierenden Betrieb in zwei Versuchsphasen (zwei Wochen im Winter, Phase IIa und vier Wochen im Frühjahr, Phase IIb) mit Stallluft aus Schweineställen durchgeführt. Beim kontinuierlichen Betrieb wird ununterbrochen Stallluft zugeführt. Im intermittierenden Betrieb wird

über eine Messgasumschaltung abwechselnd Frischluft (20 Minuten) und Stallluft (20 Minuten) in die Sensorkammer gepumpt (vgl. **Bild 3**). Zur Überprüfung in der Praxis werden die Sensoren an eine

Sensorkammer montiert. Zwischen Sensorkammer und Pumpe befindet sich das Referenzmessgerät, das entweder das Messgas im Bypass selbsttätig aus der Messgasleitung saugt oder (wie das FTIR-Spektrometer) passiv durchströmt wird. Die von den Sensoren und dem Referenzmessgerät gemessenen Ammoniakkonzentrationen werden kontinuierlich von einem Datalogger aufgezeichnet und ausgewertet. In Bild 3 ist der geschilderte Versuchsaufbau dargestellt.

## Ergebnisse

### Prozessregelung

Im wesentlichen erwies sich die in Bild 1 dargestellte Regelung als funktionsfähig. Es stellte sich allerdings heraus, dass auch die NH<sub>3</sub>-geregelt Lüftung nicht ohne Mindestluftfrate betrieben werden kann, weil die Regelung bei niedrigen Außentemperaturen relativ große Schwankungen der Stalltemperatur verursachen kann: Wenn der Temperatur-Sollwert eingehalten wird und die NH<sub>3</sub>-Konzentration über dem NH<sub>3</sub>-Sollwert liegt, wird NH<sub>3</sub> in der Regelung voll bewertet und der Stellwert der Lüftung erhöht sich. Dadurch wird sehr schnell viel kalte Luft zugeführt und die Temperatur fällt in den unteren Regelbereich. In der Folge sinkt die Luftfrate gegen Null und die Heizung wird auf Höchstleistung geregelt. Auf diese Weise wird der Temperatursollwert in kurzer Zeit wieder erreicht, aber auch NH<sub>3</sub> wieder voll für die Regelung bewertet und der oben geschilderte Vorgang wiederholt sich. Diese zyklischen Regelkreise führen zu Luftzug und einem sehr ungleichmäßigen Stallklima, das vor allem in der Schweinehaltung nicht erwünscht ist. Ist eine Mindestluftfrate als Stellgröße akti-

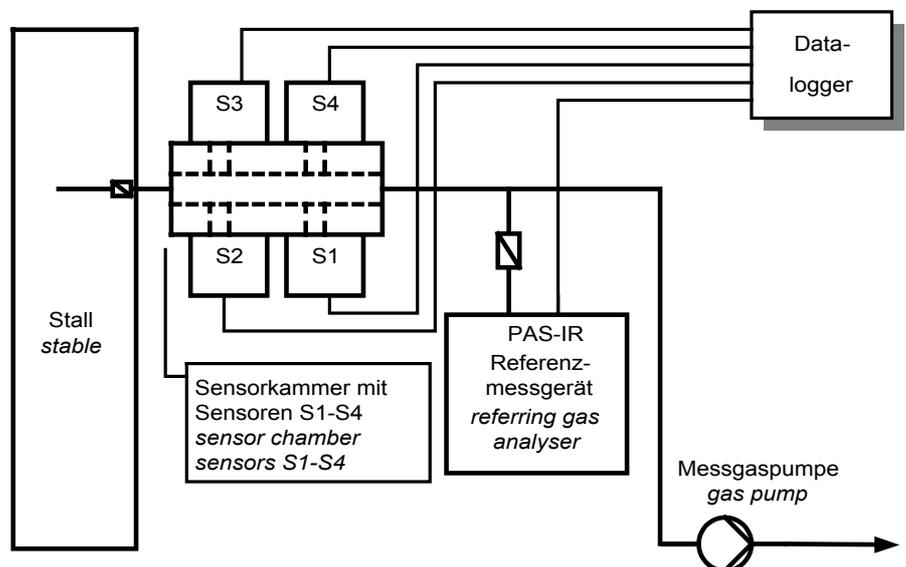


Bild 3: Schema des Versuchsaufbaus zur Sensorüberprüfung in der Praxis

viert, so werden die starken Schwankungen der Lüftung bei niedrigen Außentemperaturen unterdrückt. Zur Sicherheit wurde eine automatische Erhöhung der Mindestluftfrate (von 0 auf 20 %) bei fallenden Außentemperaturen in den Regelungsprozess integriert.

## Labor

### Linearität

Um die Linearität zu überprüfen, wurden die Sensoren an der Gasmischstation zunächst mit  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen von 10, 20, 35 und 50 ppm und synthetischer Luft beaufschlagt, in einem zweiten Schritt zusätzlich mit 12.000 ppm  $\text{H}_2\text{O}$ . Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2** als Funktion der Ausgangsspannung dargestellt. Sie zeigen, dass die  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentration einen Einfluss auf die Funktion des Sensors haben kann. Zum Teil sind die nicht linearen Funktionen dadurch erklärbar, dass die Sensoren, die für größere Messbereiche konzipiert sind, nicht gemäß Betriebsanleitung kalibriert wurden, sondern lediglich die Empfindlichkeit der Sensoren erhöht wurde. Auf den Einsatz in einer schadgasgeregelten Lüftung hat die Linearität keinen Einfluss (vorausgesetzt sie ist konstant), da bei bekannten Zusammenhängen zwischen  $\text{NH}_3$ -Konzentration und Ausgangsspannung eine Funktion oder eine Tabelle mit Konzentrationen und zugehörigen Spannungen in die Regelungssoftware integriert werden kann.

### Selektivität (Querempfindlichkeit) und Messgenauigkeit

Die Ergebnisse zur Selektivität sind in **Tabelle 3** zusammen mit den Ergebnissen zur Messgenauigkeit dargestellt. Mit verschiedenen  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentrationen wurde die Querempfindlichkeit zu Wasser getestet. Da jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Sensoren auch auf nicht erwähnte Gase reagieren, wurden Versuche zur Selektivität mit 1000 ppm  $\text{CO}_2$ , 20 ppm  $\text{CH}_4$ , 2 ppm  $\text{N}_2\text{O}$  in diesen stalltypischen Konzentrationen als Einzelgase durchgeführt. Aus diesen Versuchen ergaben sich keine Hinweise auf Querempfindlichkeiten. Deshalb wurden die oben erwähnten Gase als Gasgemisch zusätzlich mit 20 ppm  $\text{NH}_3$  und 12.000 ppm  $\text{H}_2\text{O}$  angereichert, um eine Summenwirkung der Gase auf die Messgenauigkeit der  $\text{NH}_3$ -Sensoren feststellen zu können.

Die Querempfindlichkeit auf Wasser war bei allen Sensoren gering; da die Kalibrationsfunktionen verwendet wurden, die sich aus der Kalibration mit feuchtem Prüfgas (Tabelle 2) ergaben. Beim PAS-MGU lässt sie sich durch eine Nullpunktdrift erklären, die kurz nach der Kalibration eintrat. Die Messgenauigkeiten der

Tabelle 2: Kalibrationsfunktionen der Sensoren

| Sensor/<br>Gerät | Kalibrationsfunktion<br>(0, 10, 20, 35, 50 ppm<br>$\text{NH}_3$ ) | Bestimmtheitsmaß $R^2$ | Kalibrationsfunktion<br>(12.000 ppm $\text{H}_2\text{O}$ und 0,<br>10, 20, 35, 50 ppm $\text{NH}_3$ ) | Bestimmtheitsmaß $R^2$ |
|------------------|---|------------------------|---|------------------------|
| PAS-MGU          | $y = 105,66x + 0,0065$  | 0,9996                 | $y = 99,689x + 0,4866$  | 0,9993                 |
| OC II            | $y = 281,29x^3 - 305,66x^2 + 133,47x - 18,495$                    | 0,9994                 | $y = 125,88x^3 - 14,828x^2 - 17,945x + 3,4539$  | 0,9503                 |
| ECS II           | $y = 495,28x - 98,99$   | 0,9989                 | $y = 518,65x - 106,81$  | 0,9945                 |
| OC I             | $y = 312,7x - 62,957$   | 0,9982                 | $y = 239,61x - 49,603$  | 0,983                  |
| ECS I            | $y = 137,54x - 26,849$  | 0,9996                 | $y = 132,75x - 25,371$  | 0,9995                 |
| MOS I            | $y = 409,07x - 81,65$   | 0,9984                 | $y = 0,337e^{5,1831x}$  | 0,9966                 |
| MOS II           | $y = 1889,8x^3 - 1052,4x^2 + 238,84x - 21,095$                    | 0,9895                 | $y = 2258,5x^2 - 911,9x + 91,856$   | 0,9995                 |

Tabelle 3: Sensorüberprüfung im Labor: Querempfindlichkeit zu Wasser, Messgenauigkeit bei variablen Gasgemischen

|  | PAS-MGU | MOS I | MOS II       | OC I        | OC II       | ECS I | ECS II |
|--|---------|-------|--------------|-------------|-------------|-------|--------|
| Querempfindlichkeit zu Wasser [ppm/% $\text{H}_2\text{O}$ ]  | -2,8    | 0,1   | 1,1          | -1,9        | 0,1         | 1,2   | -1,7   |
| 20 ppm $\text{NH}_3$ + 6000 ppm $\text{H}_2\text{O}$   | -2,6    | -2,3  | -3,4         | <b>5,2</b>  | <b>1,7</b>  | 0,8   | -0,9   |
| 20 ppm $\text{NH}_3$ + 12000 ppm $\text{H}_2\text{O}$  | -4,0    | -5,0  | <b>-23,8</b> | <b>12,0</b> | <b>16,7</b> | 1,4   | -2,9   |
| 20 ppm $\text{NH}_3$ + 18000 ppm $\text{H}_2\text{O}$  | -2,4    | -3,2  | <b>-7,7</b>  | <b>6,9</b>  | <b>11,6</b> | 1,3   | -0,2   |
| 30 ppm $\text{NH}_3$ + 12000 ppm $\text{H}_2\text{O}$  | -1,7    | -2,5  | -2,9         | <b>5,7</b>  | <b>15,7</b> | 1,7   | 0,2    |
| 50 ppm $\text{NH}_3$ + 12000 ppm $\text{H}_2\text{O}$  | -       | -5,0  | -9,3         | <b>10,6</b> | <b>15,0</b> | 1,1   | -0,9   |
| 20 ppm $\text{NH}_3$ + 12000 ppm $\text{H}_2\text{O}$ + 20 ppm $\text{CH}_4$ + 2 ppm $\text{N}_2\text{O}$ + 1000 ppm $\text{CO}_2$ | -3,4    | -3,7  | <b>-8,4</b>  | <b>13,0</b> | <b>7,2</b>  | 0,8   | -0,1   |

Sensoren OC I, OC II und MOS II waren unbefriedigend (Tabelle 3, fett).

## Praxis

### Kontinuierlicher Betrieb, Phase I

Die Versuche zum kontinuierlichen Betrieb wurden in einem achtwöchigen Versuchsabschnitt durchgeführt. Mit 1 bis 20 ppm waren die Konzentrationen im Versuchsstall relativ niedrig. Um die Messgenauigkeit der Sensoren bewerten zu können, wurden die Gaskonzentrationen in vier Klassen von je 5 ppm eingeteilt, die Werte jeder Klasse gemittelt und die Messgenauigkeit zum PAS-IR Referenzmessgerät berechnet. Diese Messgenauigkeit wurde in der ersten und in der letzten Messwoche berechnet, um so Effekte zu erfassen, die durch die permanente Schadgasbeaufschlagung entstehen. Dazu gehören Sensoralterung und „-übersättigung“. In **Bild 4** (Sensoren mit größeren Abweichungen vom Referenzwert) und **Bild 5** (Sensoren mit geringeren Abweichungen vom Referenzwert) sind die Ergebnisse der Sensorüberprüfung im kontinuierlichen Betrieb dargestellt. Die erste Säule repräsentiert den Messwert der ersten Woche, die zweite den der letzten Woche in der keine  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen > 15 ppm auftraten. Konstante Abweichungen in allen Konzentrationsklassen lassen auf einen Offset schließen. MOS II und OC I zeigen sehr hohe Abweichungen von den Referenzwerten (Bild 4) und

auch hohe Standardabweichungen der Mittelwerte. Damit scheiden diese Sensoren für den Einsatz in einer schadgasgeregelten Lüftung aus. Bei ECS II sind relativ hohe Abweichungen von mehr als 10 ppm zu beobachten, die aber in allen Konzentrationsklassen konstant sind und damit auf einen tolerierbaren Offset schließen lassen. Insbesondere PAS-MGU, aber auch ECS I und MOS I halten die Anforderungen an die Sensoren (s. o.) zum größten Teil ein, speziell bei den höheren Konzentrationsstufen. Allerdings ändert ECS I seine Abweichung von positiv (1. Woche) zu negativ (letzte Woche). Dies lässt auf die bei elektrochemischen Sensoren bekannte Sensorübersättigung schließen. OC II zeigt mit zunehmender Messdauer geringere Konzentrationen an. Dieser Sensor wurde nach der kontinuierlichen Messung durch ein laut Herstellerangaben weiterentwickeltes Gerät ausgetauscht.

### Intermittierender Betrieb, Phasen IIa und IIb

Beim intermittierenden Betrieb (Phasen IIa und IIb) wird den Sensoren in zwanzigminütigen Abständen für jeweils 20 Minuten „reine“ Außenluft durch eine Messgasumschaltung zugeführt. Durch dieses Spülen mit Nullluft soll erreicht werden, dass Übersättigungseffekte vermieden werden können. **Bild 6** belegt, dass der Nullpunkt einiger Sensoren schon wenige Stunden nach Beginn einer

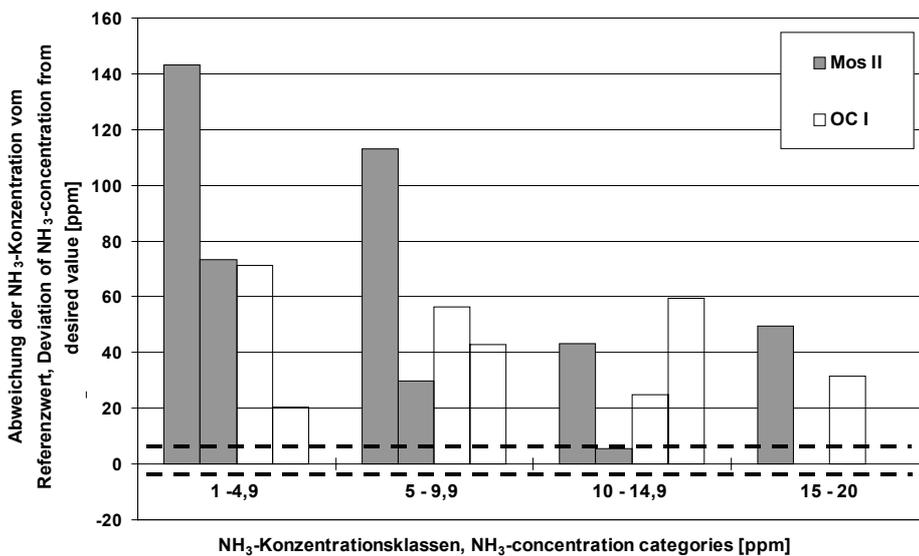


Bild 4: Ergebnisse der Sensortests im kontinuierlichen Betrieb (Phase I), Sensoren mit hohen Abweichungen vom Referenzwert, die gestrichelte Linie zeigt die tolerierbare Messgenauigkeit an

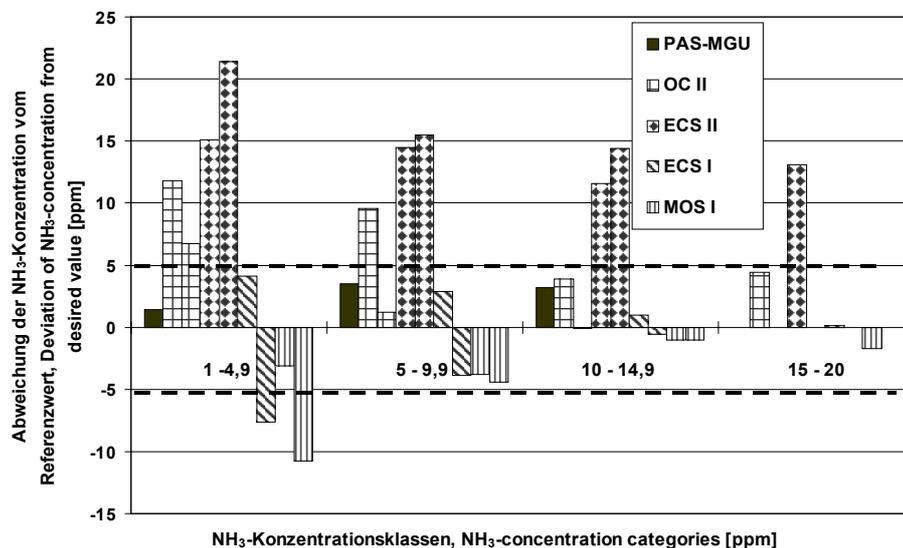


Bild 5: Ergebnisse der Sensortests im kontinuierlichen Betrieb (Phase I), Sensoren mit geringen Abweichungen vom Referenzwert, die gestrichelte Linie zeigt die tolerierbare Messgenauigkeit an, PAS-MGU in der ersten Versuchswoche nicht betriebsbereit

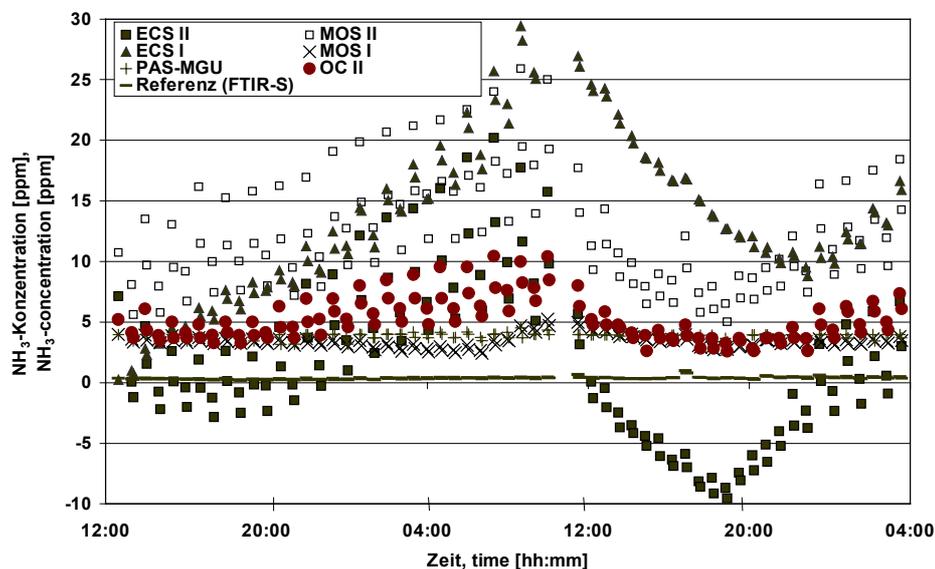


Bild 6: Verhalten der Sensoren bei Zufuhr von Außenluft im intermittierenden Betrieb (Phase IIa)

Messung stark driftet, da sie sich nach der Beaufschlagung mit Stallluft nicht vollständig regenerieren können und somit ihren Nullpunkt nicht erreichen. Das  $\text{NH}_3$ -Konzentrationsniveau der Zuluft liegt im Durchschnitt bei ca. 0,5 ppm (Referenz FTIR-S). Dieser Effekt war bei den Messungen immer nach mehrstündigen Unterbrechungen der Messungen zu beobachten, während denen die Sensoren mit Nullluft gespült wurden. Das in Bild 6 dargestellte Steigen und Fallen des Nullpunktniveaus hängt mit den unterschiedlichen  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen der Stallabluft zusammen. Je niedriger das  $\text{NH}_3$ -Niveau vor der Spülung mit Zuluft war, desto niedriger ist in der Regel auch das Nullpunktniveau.

In **Bild 7** (Sensoren mit geringeren Abweichungen) und **Bild 8** (Sensoren mit größeren Abweichungen) sind die Abweichungen vom Referenzmessgerät bei intermittierendem Betrieb dargestellt. Die erste Säule stellt die mittlere Abweichung vom mittleren Messwert des Referenzmessgerätes unter Winterbedingungen (Phase IIa; keine Werte in den Konzentrationsklassen 5-9,9 ppm, 10-14,9 ppm und 15-19,9 ppm) dar, die zweite Säule die Abweichungen unter Frühjahrsbedingungen (Phase IIb). Das PAS-MGU, das nur im Frühjahr im Einsatz war weicht im Mittel immer in Höhe der geforderten Messgenauigkeit vom Messwert ab. Der Sensor OC II weicht in der Winterperiode positiv vom Messwert des Referenzgerätes ab, im Frühjahr negativ. MOS I weicht bei höheren Messwerten stark vom Referenzwert ab, wobei im Frühjahr die Abweichung etwas kleiner ausfällt. Im Gegensatz dazu überschreitet der Sensor MOS II die geforderte Messgenauigkeit bei weitem, aber auch ECS I und II erreichen die notwendigen Anforderungen nicht. Der Sensor OC I brachte in dieser Versuchsphase keine verwertbaren Ergebnisse und war auch nicht mehr kalibrierbar.

#### Fazit der Sensorüberprüfung

Für den Dauereinsatz in einer schadgaseregelten Lüftung ist nach derzeitigem Kenntnisstand keiner der getesteten Einfachsensoren geeignet. Bei der Laborüberprüfung erfüllten OC I, OC II, der später ausgetauscht wurde und MOS II nicht die Auswahlkriterien. Im Praxisbetrieb waren MOS II und OC I ebenfalls nicht innerhalb der geforderten Messgenauigkeiten. Die elektrochemischen Sensoren ECS I und ECS II weichen entweder bei niedrigen oder hohen Konzentrationen weit vom Referenzwert ab oder haben uneinheitliche Abweichungen vom Referenzwert über längere Zeiträume, so

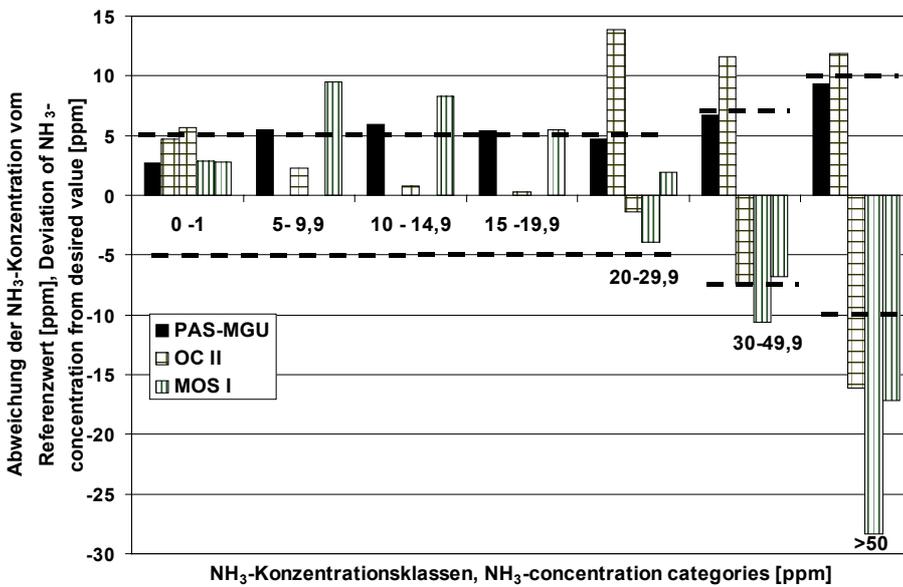


Bild 7: Ergebnisse der Sensortests im intermittierenden Betrieb (Phase IIa und Phase IIb), Sensoren mit geringen Abweichungen vom Referenzwert, die gestrichelte Linie zeigt die tolerierbare Messungengenauigkeit an, PAS-MGU in Phase IIa nicht betriebsbereit.

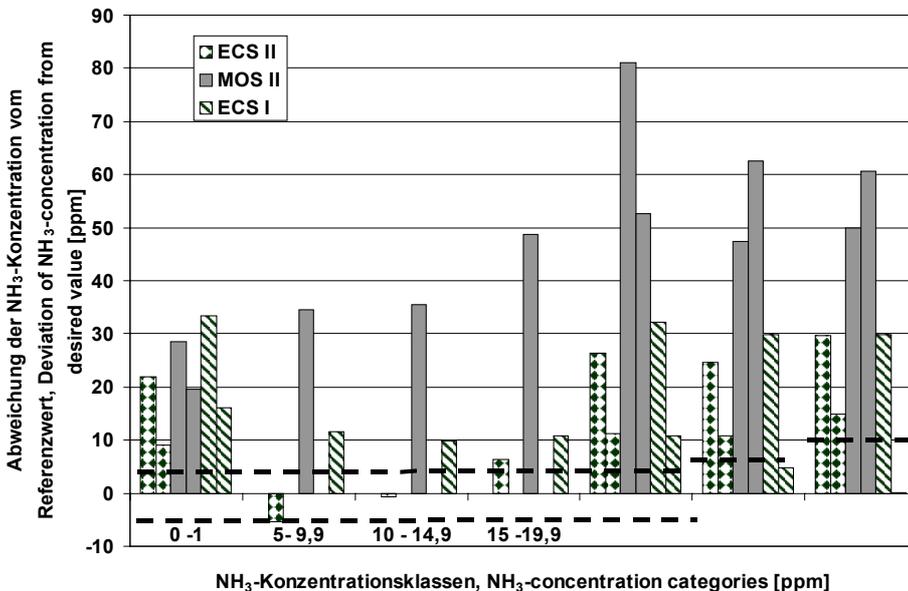


Bild 8: Ergebnisse der Sensortests im intermittierenden Betrieb (Phase IIa und Phase IIb), Sensoren mit höheren Abweichungen vom Referenzwert, die gestrichelte Linie zeigt die tolerierbare Messungengenauigkeit an.

dass der Benutzer nicht auf zuverlässige Werte zurückgreifen kann. Der Sensor OC II ist in der zweiten Version verbessert, verändert sich aber auch stark über die Zeit. MOS I zeigt besonders bei hohen  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen große Abweichungen vom Referenzwert. Das getestete PAS-MGU erwies sich zumindest während der Testphasen als wenig betriebssicher, da es öfter repariert werden musste, ansonsten würde es eine Alternative zu den Einfachsensoren darstellen.

## Schlussfolgerungen

Eine schadgasgeregelte Lüftung wurde technisch realisiert. Kostengünstige Sensortechnik hierfür muss noch optimiert werden. Eine Einordnung des Verfahrens unter wirtschaftlichen und umwelttechnischen Gesichtspunkten und nach Kriterien der Tiergerechtigkeit erfolgt im Rahmen laufender Arbeiten.

## Literatur

- [1] *BGBI* (Bundesgesetzblatt) (1992): Jahrgang 1992 Teil I, S. 1977-1980: Verordnung zum Schutz von Kälbern bei Stallhaltung (Kälberhaltungsverordnung).

- [2] *BGBI* (Bundesgesetzblatt) (1994): Bekanntmachung der Neufassung der Schweinehaltungsverordnung, Bonn.
- [3] *DIN*, Deutsches Institut für Normung e.V. (1992): Wärmeschutz geschlossener Ställe, Wärmedämmung und Lüftung, Planungs- und Berechnungsgrundlagen.
- [4] Grotz, W. und Gronauer, A. (1998): Schadgassensoren. In: *Landtechnik* 53/6, 380-381.
- [5] *VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Arbeitsgruppe zur Kennzeichnung vollständiger Meßverfahren* (1987): Grundlagen zur Kennzeichnung vollständiger Meßverfahren Begriffsbestimmungen. In: *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft VDI 2449*, Blatt 2, 2-6.
- [6] Nesper, S., Gronauer, A. und Schön, H. (1999): Vergleich der Emissivität von Mast Schweinehaltungen mit Oberflur- und Unterflurabsaugung. In: Tagung: Bau, Technik und Umwelt 1999 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. *Landtechnik* Weihenstephan, Freising, 51-56.
- [7] Depta, G., Nesper, S., Becher, S., Stanzel, H. und Gronauer, A. (1996): Multigasanalyse der Emissionsraten landwirtschaftlicher Quellen, Darstellung der Meßverfahren FTIR und Laser-Anemometrie. In: *Landtechnik* 51, no.4, 206-207.

Die Arbeiten werden finanziert vom Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Fördernummer: A/97/30). Freundlich unterstützt wurden die Arbeiten von Ziehl-Abegg GmbH, Schönhammer Lüftungstechnik und Westfalen-Gas.

## Autoren

Dipl.-Ing. agr. Walter Grotz  
TU München  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Abteilung Umwelttechnik der Landnutzung  
Am Staudengarten 3  
85354 Freising  
Tel.: +49/(0)8161/713796  
Fax: +49/(0)8161/714546  
E-mail: [grotz@tec.agrar.tu-muenchen.de](mailto:grotz@tec.agrar.tu-muenchen.de)

Dipl.-Ing. agr. Barbara Rathmer  
TU München  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Abteilung Umwelttechnik der Landnutzung  
Am Staudengarten 3  
85354 Freising  
Tel.: +49/(0)8161/713792  
Fax: +49/(0)8161/714546  
E-mail: [barbara@tec.agrar.tu-muenchen.de](mailto:barbara@tec.agrar.tu-muenchen.de)

Dr. agr. Andreas Gronauer  
TU München  
Bayerische Landesanstalt für Landtechnik  
Abteilung Umwelttechnik der Landnutzung  
Am Staudengarten 3  
85354 Freising  
Tel.: +49/(0)8161/713453  
Fax: +49/(0)8161/714546  
E-mail: [gronauer@tec.agrar.tu-muenchen.de](mailto:gronauer@tec.agrar.tu-muenchen.de)

Univ.-Prof. Dr. agr. Dr. h. c. (AE) Hans Schön  
Bayer. Landesanstalt für Landtechnik  
Vöttinger Str. 36  
85350 Freising-Weihenstephan  
Tel.: +49/(0)8161/713441  
Fax: +49/(0)8161/713895  
[schoen@tec.agrar.tu-muenchen.de](mailto:schoen@tec.agrar.tu-muenchen.de)