

6. Zusammenfassung

Basierend auf den Ergebnissen langjähriger Untersuchungen konnten bekannte Feuchtgetreidekonservierungsverfahren vergleichend beurteilt werden. Dabei zeigte sich neben der mit einer Kostenvergleichsrechnung [5] nachgewiesenen ökonomischen Überlegenheit der Lagerung ganzer Körner in gasdichten Hochsilos auch deren Überlegenheit hinsichtlich der Funktion, nachgewiesen durch die Nutzwertanalyse. Die Ergebnisse machen deutlich, daß die Nutzwertanalyse ein geeignetes Instrumentarium darstellt, Investitionsentscheidungen – insbesondere im landwirtschaftlichen Bauwesen – transparent zu machen.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Fiedler, E. u. T. Jungbluth:* Vermahlener Feuchtweizen in nicht gasdichten Silos. Versuchs- und Erfahrungsbericht 1987/88 der Landesanstalt für Schweinezucht Forchheim, Kap. 6.5, S. 115/26.
- [2] *Fiedler, E. u. T. Jungbluth:* CCM- und Feuchtgetreideversuche 1983 bis 1987. Versuchs- und Erfahrungsbericht 1987/88 der Landesanstalt für Schweinezucht, Forchheim, Kap. 6.6, S. 127/33.
- [3] *Jungbluth, T.:* Beurteilung von Verfahren der Feuchtgetreidekonservierung. Habilitationsschrift, Univ. Hohenheim 1989, Forschungsbericht Agrartechnik der Max-Eyth-Gesellschaft Nr. 161.
- [4] *Jungbluth, T., G. Schneider u. E. Fiedler:* Beurteilung von neuen Futtergetreide-Feuchtkonservierungsverfahren mit biochemischem Wirkprinzip. *Grundl. Landtechnik* Bd. 38 (1988) Nr. 3, S. 93/97.
- [5] *Jungbluth, T.:* Kosten von Feuchtgetreidekonservierungsverfahren. *Landtechnik* Bd. 45 (1990) Nr. 3.
- [6] ● *Blohm, H. u. K. Lüder:* Investition; Schwachstellen im Investitionsbereich des Industriebetriebes und Wege zu ihrer Beseitigung. München: Vahlen 1988.
- [7] ● *Gäfen, G.:* Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung. Tübingen: Mohr 1968.
- [8] ● *Heinen, E.:* Grundlagen betriebswirtschaftlicher Entscheidungen – Das Zielsystem der Unternehmung. Wiesbaden: Gabler 1971.
- [9] ● *Zangemeister, C.:* Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. München: Wittemann 1976.
- [10] *Kunze, D., H.-D. Blanek u. D. Simons:* Nutzwertanalyse als Entscheidungshilfe für Planungsträger. *KTBL-Schrift* 184 Darmstadt: KTBL 1974.
- [11] *Lagally, R., R. Lemberg u. M. Wagner:* Zur Anwendung der gekoppelten Ziel- und Nutzwertanalyse. *Structur, Zeitschr. für Planung, Entwicklung* Bd. 8 (1972) S. 177/90.
- [12] *Eekhoff, J.:* Nutzen-Kosten-Analyse und Nutzwertanalyse als vollständige Entscheidungsmodelle. *Raumforsch. und Raumordn.* Bd. 31 (1973) Nr. 2, S. 93/102.
- [13] *Bendull, K. u. F. Dahse:* Die Bewertung von Verfahren der Tierproduktion in der Phase von Forschung und Entwicklung unter Anwendung der Gebrauchswert-Kosten-Analyse. *Agrartechnik* Bd. 26 (1976) S. 386/89.
- [14] *Lorenz, J.:* Einstreulose Ferkelerzeugung. *KTBL-Schrift* 255, Darmstadt: KTBL 1981.
- [15] *Jungbluth, T.:* Die Nutzwertanalyse als Methode zur analytischen Beurteilung baulicher und technischer Einrichtungen. *Bay. landw. Jb.* Bd. 57 (1980) S. 810/16.

Kontinuierliche Ammoniakmessungen in Ställen

Von Karl-Heinz Krause und Jan Janssen,
Braunschweig-Völkenrode*)

DK 631.22:614.71:546.171.1.08

Zur Klimagestaltung in geschlossenen Ställen gehört neben dem Wissen um die Wärmemengen, den Wasserdampfgehalt und den Kohlendioxidanteil in der Stallluft auch die Kenntnis über Ammoniakkonzentrationen. Mit Hilfe mikroelektronischer Sensoren werden kontinuierliche Konzentrationsaufzeichnungen vorgenommen. Sie sollen dazu dienen, die Anteile der verschiedenen stallinternen Emissionsquellen an der Gesamtemission aufzuschlüsseln. Darüber hinaus erlaubt die kontinuierliche Datenerfassung im Gegensatz zu den üblichen Mittelwertbetrachtungen verlässliche Aussagen über den Ausstoß von Ammoniak in die Umwelt.

*) *Dr.-Ing. K.-H. Krause* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Biosystemtechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. A. Munack) und *Dr.-Ing. J. Janssen* wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Einleitung

Das Thema Ammoniakmessungen und ihre Auswertung, an dem neben den Autoren mehrere Mitarbeiter des Instituts für Biosystemtechnik aus den Bereichen der Mikroelektronik und der Datenverarbeitung beteiligt sind¹⁾, wird in 5 Schritten behandelt.

Zunächst wird in Abschnitt 1 die Aufgabenstellung umrissen. Dabei wird erläutert, vor welchem Hintergrund diese zu sehen ist. Emissionsmindernde Maßnahmen heißt das allgemeine Ziel [1], das auch für die Tierhaltung gilt. Menschliche Aktivitäten können von umweltfördernd bis umweltschädlich reichen. In der Landwirtschaft wird eine umweltverträgliche bzw. umweltschonende Bewirtschaftung angestrebt.

¹⁾ Unser besonderer Dank gilt Herrn Mack, Herrn Pardylla und Herrn Zielstorff sowie Herrn Hake für ihren engagierten Einsatz um die praxisgerechte Umsetzung der Sensormeßtechnik und um die Programmpflege in der Strömungssimulation stallinterner Luftbewegungen.

Tierhaltung ohne Emissionen gibt es nicht [2]. Wenn gezielt emissionsmindernd [3, 4] in die Stallklimatisierung eingegriffen werden soll, dann muß das System Stall quantifizierbar sein. Will man Ammoniakemissionen mindern, muß man die Strategien der Luftführung [5 bis 11] unter Berücksichtigung der stallinternen Ammoniakquellen verbessern – und darf dabei das Tier mit seinen Belangen nicht vergessen [12, 13]. Deshalb wird im Abschnitt 2 dargestellt, was im System Tierhaltung bereits beschrieben werden kann. Es geht um die Mathematisierbarkeit der landwirtschaftlichen Tierhaltung und dabei um den luftgetragenen Stoffaustausch, insbesondere den von Ammoniak. Um diesen Schritt machen zu können, müssen Informationen über den Stoffaustausch beschafft werden.

Zeitreihenuntersuchungen zur Ammoniakkonzentration liefern hier Aufschluß. Solche Zeitreihenuntersuchungen konnten bislang nur vereinzelt an einer begrenzten Anzahl von Meßörtern mit großem technischem Aufwand durchgeführt werden. Die Gleichzeitigkeit der Meßwertregistrierung war dabei selten gewährleistet. Tieraktivitäten wurden durch die Messung bisweilen erheblich beeinflusst, so daß die Meßergebnisse verfälscht wurden. Mit den chemisch-elektrischen Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung von Ammoniakkonzentrationen ist eine Meßtechnik erwachsen, die die genannten Nachteile herkömmlicher Meßverfahren ausschließt. Auf diese Meßtechnik wird im Abschnitt 3 eingegangen. Soweit bekannt, liegen Veröffentlichungen über Ammoniakmessungen auf dieser Basis bislang nicht vor.

Im Abschnitt 4 werden Ergebnisse der bisherigen Messungen dargestellt. Interpretationen wären nach einem Meßzeitraum von 37 Tagen noch voreilig. Allerdings lassen sich doch einige prinzipielle Aussagen über die Abhängigkeiten der örtlichen Konzentrationen und die zeitliche Mittelwertbildung zur Prognose von Emissionen treffen. Bisher waren die Aussagen eines breiten Schrittmens zur unmittelbaren Wirkung niedriger, üblicherweise im Stall nachgewiesener Schadgaskonzentrationen widersprüchlich und experimentell ungenügend abgesichert [14], zumal an einem Meßpunkt zu verschiedenen Zeiten sehr starke Schwankungen in der Höhe der gemessenen Konzentration auftreten. Mit der Sensormeßtechnik hat sich mittlerweile in Verbindung mit der Simulation von Austauschvorgängen [15, 16] ein neuer Zugang zu den stallinternen Geschehnisabläufen eröffnet.

Der Abschnitt 5 umreißt, was noch zu machen ist – und das ist sehr viel. Mit dem Einsatz der hier vorgestellten mikroelektronischen Meßtechnik wurde Neuland betreten. Als Konsequenz der ersten Erfahrungen im Einsatz dieser sensiblen Meßtechnik wird zur Erfassung der räumlichen Konzentrationsverteilung von Ammoniak in Ställen die Anzahl der Sensorelemente erheblich vergrößert. Über die Ergebnisse wird zur gegebenen Zeit wieder berichtet.

1. Aufgabenstellung

Ein optimaler tiergerechter Klimazustand gewährleistet einen leistungsfähigen Tierbesatz [17, 18]. Um einen optimalen tiergerechten Klimazustand in den Stallungen zu erreichen und aufrechtzuerhalten, ist ein Luftaustausch mit der Umgebung [19] erforderlich. Mit der Abluft gelangen Stoffwechsel- und Gärprodukte in die Umwelt. Hierdurch verursachte Immissionen machen sich als Gerüche bemerkbar [14, 20, 21]; dabei können Ammoniakimmissionen auch zu Schädigungen der Biota in der Nähe der Tierhaltung [22] führen. Ammoniak ist im Regenwasser in der unmittelbaren Umgebung von Tierhaltungsbetrieben nachzuweisen [23], so daß Ammoniak aus der Tierhaltung in den Problembereich "Saurer Regen" einbezogen wird. Globale Emissionsberechnungen werden angestellt [24], wobei gewisse Unsicherheiten zu Fehleinschätzungen bis zu 35 % führen. Immerhin sollen von der gesamten jährlichen Ammoniakemission in Europa von 6,4 Mio. t 81 % aus der Tierhaltung stammen.

Es ist daher etwas zu unternehmen [22]. In Auswertung einer Literaturrecherche schlägt das Bundesamt für Ernährung und Forsten zur Verminderung von Ammoniakemissionen vor, Investitio-

nen für technisch geeignete Entwicklungen, wie Entsorgung der Abluft und Änderung der Aufstallungsform, zu fördern. Erforderlich sei auch die Anpassung von Rechtsvorschriften sowie eine verstärkte Forschung [25].

Diese Forderungen nach Entsorgung der Abluft und Änderung der Aufstallungsform können jedoch nur dann wirkungsvoll umgesetzt werden, wenn die Möglichkeiten der stallinternen Beeinflussung der Gesamtemission bekannt sind.

In der TA Luft [1] heißt es, daß Emissionen von Stäuben und Gerüchen in den Abgasen von Ställen (gemeint ist die Abluft) durch eine Regelung der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und der Luftmenge soweit wie möglich zu vermeiden sind. Es wird von Regelung gesprochen, wobei zu klären bleibt, wonach geregelt werden soll. Soweit tierphysiologische Optimalwerte bekannt sind, sind diese als Sollwerte vorzugeben. Es ist dann Aufgabe der Regeltechnik nach Messen der Trocken- und Feuchttemperaturen über Regelgrößen, z.B. über die Enthalpie- und Feuchtegraddifferenzen zwischen Stall- und Außenluft [26] oder über den korrekturbedürftigen [27] Wasserdampfmaßstab in der DIN 18910 [28], den Abluftvolumenstrom [29] so einzustellen, daß die gewünschten Werte für die Trocken- und Feuchttemperatur erzielt werden. Es bleibt aber zu fragen, wo diese Werte erreicht werden sollen, z.B. 1,5 m über dem Stallfußboden [30].

Bei der sehr häufig verwendeten thermostatgesteuerten Drehzahlregelung der Ventilatoren für die Stalllüftung wird so verfahren. Bei aufwendigeren systemorientierten Regelgeräten [31, 32] muß wiederum das Gesamtströmungsgeschehen im Luftbereich des Stalles Berücksichtigung finden: wenn schon nicht in seiner komplexen örtlichen Differenzierung, so doch wenigstens durch die Strukturierung in markante Zonen [33 bis 36].

Im Hinblick auf die Ausbreitung der von den stallinternen Quellen herrührenden Schadgase wird im allgemeinen eine Gleichmäßigkeit der Durchlüftung gefordert. Die Strömungsverhältnisse im Stall lassen aber eine ideale Durchmischung (Rührkesseltheorie) als Illusion erscheinen. Gleichmäßigkeit ist eher so zu verstehen, daß alle Raumbereiche etwas von der Stalllüftung erfahren, daß es nicht zu Bereichen mit Wärmetausch kommt oder sich Feuchtester aufbauen [37], die wiederum die Ammoniakbildung fördern. Das heißt aber, daß über kontinuierliche Ammoniakmessungen im Stallbereich zunächst nachzuweisen ist, welche Konzentrationsfelder sich unter welchen lüftungstechnischen Bedingungen entwickeln, ehe man eine Emissionsminderungsstrategie propagiert.

Die aus dem Stall während der Zeitspanne $t_b - t_a$ emittierte Ammoniakmasse M_A ergibt sich aus dem Zeitintegral des emittierten Massenstromes \dot{m}_A

$$M_A = \int_{t_a}^{t_b} \dot{m}_A dt \quad (1)$$

Dieser Massenstrom \dot{m}_A ist das Produkt aus der Konzentration c_0 in der Abluft und dem Abluftvolumenstrom \dot{V}_0 . Legt man in eine Ecke des Stalles den Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems $O(x, y, z)$, so wird der Abluftvolumenstrom am Ort des Austritts durch den Ortsvektor $\vec{r} = \vec{r}(x_0, y_0, z_0)$ beschrieben:

$$\dot{m}_A = c_0(x_0, y_0, z_0) \dot{V}_0 = w_0 c_0 A_0 \quad (2)$$

Der Abluftvolumenstrom ist z.B. bei einer Überfirstentlüftung gekennzeichnet durch die vertikale Austrittsgeschwindigkeit w_0 aus dem Austrittsquerschnitt A_0 . Die Austrittsgeschwindigkeit w_0 ist durch Steuerung oder gar Regelung vorgegeben [32, 38, 39] als $w_0 = w_0(t, T, \dots)$, wobei t für die Zeit und T für die Temperatur steht.

Nach Oldenburg [21] besteht nicht nur für Geruchsstoffe (Regressionskoeffizient $r = 0,63$), sondern auch für Ammoniak ($r = 0,56$) ein affiner Zusammenhang zwischen dem Emissionsmassenstrom und dem Volumenstrom, allgemein ausgedrückt:

$$\dot{m}_A = a + b \dot{V}_0$$

Daraus folgt mit Gl. (2), daß sich die Konzentration am Abluftaustritt hyperbelartig mit dem Abluftvolumenstrom ändert:

$$c_0 = \frac{a}{\dot{V}_0} + b.$$

Sinkt der Abluftvolumenstrom auf Null, dann wird hiernach die Konzentration unendlich groß; die physikalische Bedingung, daß ein auf Null sinkender Massenstrom eine auf Null sinkende Konzentration oder einen auf Null sinkenden Volumenstrom fordert, wird nicht erfüllt. Wird der Volumenstrom sehr groß, dann nähert sich die Konzentration einem konstanten Wert.

In diesem Zusammenhang heißt es aber auch in der KTBL-Schrift [21]: "Wieweit die Luftrate . . . die Emission beeinflusst, wird durch das Strömungsprofil im Stallraum mitbestimmt. . . . Diese Einflußgröße ist nur mit großem Aufwand zu erfassen, . . ." Mit der Sensortechnik hält sich, wie die ersten Ergebnisse zeigen, der Aufwand in Grenzen. Und andererseits ist die allgemeine Gültigkeit einer funktionalen Beziehung der angegebenen Form, die ohne Kenntnis der wichtigsten Einflußgröße auf den Stoffübergang und -transport im Stall, der örtlichen Luftgeschwindigkeit, aus Zeitreihenmessungen an einem Ort abgeleitet wurde, in Frage zu stellen. Regressionsanalysen lassen bei fast gleich schlechten Regressionskoeffizienten den physikalisch sinnvolleren Ansatz:

$$\dot{m}_A = a \dot{V}_0^b$$

zu. Daraus folgt für die Konzentration am Abluftaustritt

$$c_0 = a \dot{V}_0^{b-1}.$$

Entsprechend dieser Beziehung kann je nach Strömungssituation im Stall die Konzentration mit dem eingestellten Abluftvolumenstrom zunehmen oder auch kleiner werden.

Die Konzentration c_0 an der Abluftaustrittsstelle ergibt sich aus dem Konzentrationsfeld $c(x, y, z)$, wie es sich aufgrund der strömungsdynamischen Randbedingungen im Stallbereich gemäß der Kontinuitätsbeziehung und dem Einfluß von Quellen \dot{Q} und Senken \dot{S} mit ihren jeweiligen Strömen an Ammoniak einstellt:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(C\vec{V}) + \text{div}(c'\vec{v}') = \dot{Q} - \dot{S} \quad (3).$$

Hierbei sind die Konzentration c und die Geschwindigkeitsanteile u, v, w in den Raumrichtungen x, y, z in Mittelwerte (Großbuchstaben) und Schwankungsgrößen (apostrophiert) aufgeteilt worden,

$$c = C + c', u = U + u', v = V + v', w = W + w' \quad (4).$$

Setzt man für das Mittelungsprodukt die Gradientenbeziehung

$$\overline{c'v'} = -D \nabla C \quad (5)$$

an, so bestimmt sich die Konzentrationsverteilung im Stall nach

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(C\vec{V}) + \text{div}(-D \nabla C) = \dot{Q} - \dot{S} \quad (6).$$

Die Diffusionskoeffizienten des turbulenten Diffusionstensors D sind empirisch zu bestimmen, und zwar über Vergleichsrechnungen mit den Zeitreihenaufzeichnungen der Konzentrationen in Ställen. Daneben setzt die Auswertung von Gl. (6) die Kenntnis des Strömungsfeldes voraus.

Betrachtet wird ein Stall, **Bild 1**, mit den Innenmaßen: Breite $B = 8,80$ m, Länge $L = 22,8$ m und Höhe $H = 3,00$ m. Die Zuluft wird dem Stall über zwei Kanäle zugeführt, die sich über den Buchtenreihen über die gesamte Stalllänge erstrecken. Das Ansaugen erfolgt durch einen Ventilator, der in den Abluftschacht eingebaut ist. Die Buchten gliedern sich in Liegeflächen und Spaltenböden, durch die Kot und Harn in Lagergruben, die sogenannten Güllekanäle, gelangen, die parallel zur Stallängsachse unter den Buchten verlaufen. Der bodennahe Bereich stellt eine diffusive Ammoniakquelle dar. Im folgenden wird die Luftbewe-

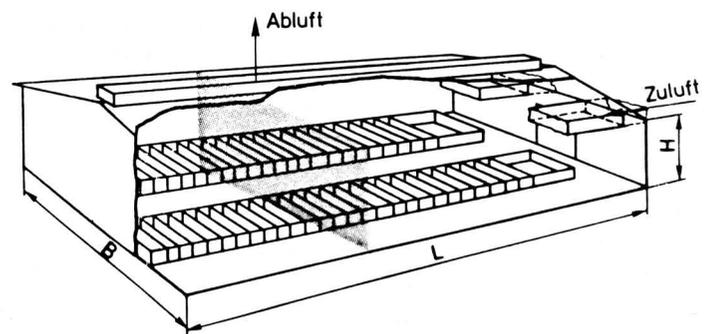


Bild 1. Untersuchungsstall, idealisiert.

gung in der hier gerastert dargestellten Schnittenebene des Stalles betrachtet, wobei der Blick entgegen der Richtung des Zuluftfeiles auf diese Ebene gerichtet ist.

Die Luftbewegung in diesem Querschnitt, **Bild 2**, wird durch Vektorpfeile dargestellt. Ihre Länge repräsentiert den Geschwindigkeitsbetrag. Die Austrittsgeschwindigkeit am Ventilator beträgt $0,5$ m/s. Eine typische Wintersituation. Frischluft wird symmetrisch zur Ventilatorposition über die Ansaugöffnungen von außen in den Stall gesaugt. Die Öffnungen sind wegen des zweiten Ganges (rechts) außermittig bezüglich der gesamten Querschnittsgeometrie angeordnet.

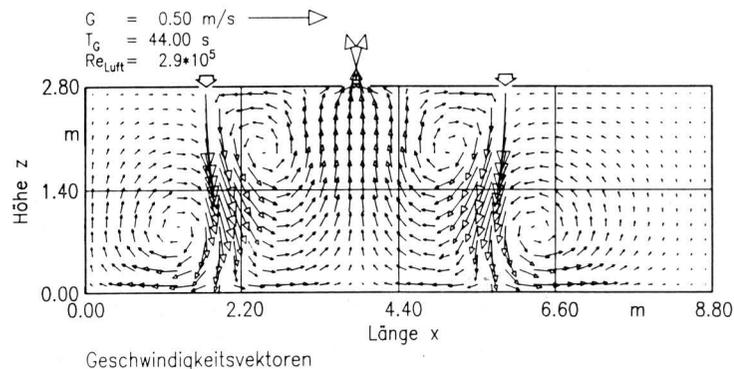


Bild 2. Geschwindigkeitsverteilung im Stallquerschnitt bei einer Absauggeschwindigkeit von $w = 0,5$ m/s.

Der Transport von Ammoniak, das sich im Bodenbereich des Stalles bildet, kann sehr anschaulich mit den Tangentenkurven an die Geschwindigkeitsvektoren erklärt werden, **Bild 3**. So ist ein konvektiver Transport, d.h. Transport durch Strömungsmithnahme, in diesem Stromlinienbild nur innerhalb der Stromröhren möglich. Ein Transport quer zu den Stromlinien kann nur durch turbulente Diffusion erfolgen. Wegen ihrer Bedeutung für den gesamten Stoffaustausch (Gl. 6) gilt es, die turbulente Diffusion mit ihren Austausch- bzw. turbulenten Diffusionskoeffizienten konkret zu ermitteln. Dazu ist es erforderlich, das Konzentrationsfeld zu messen. Aus dem anpassenden Vergleich von Simulation und Messung des Konzentrationsfeldes lassen sich die erforderlichen Parameter bestimmen.

Mit der Erhöhung der Absauggeschwindigkeit kommt Bewegung in den Luftbereich des Stalles, **Bild 4**. Die Absauggeschwindigkeit beträgt hier 4 m/s. Eine typische Sommersituation. Es bilden sich in der Anlaufphase Sekundärwirbel aus.

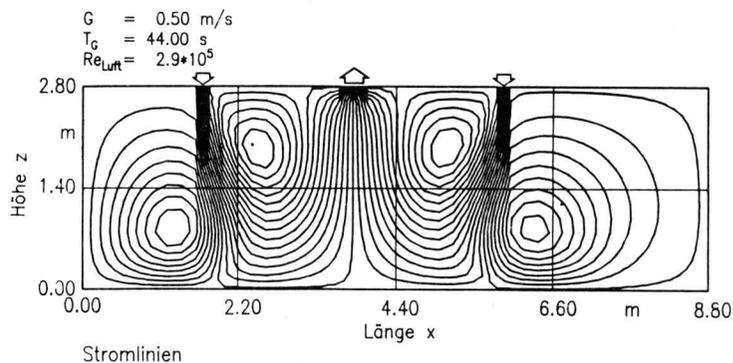


Bild 3. Stromlinienverteilung im Stallquerschnitt bei einer Absauggeschwindigkeit von $w = 0,5$ m/s.

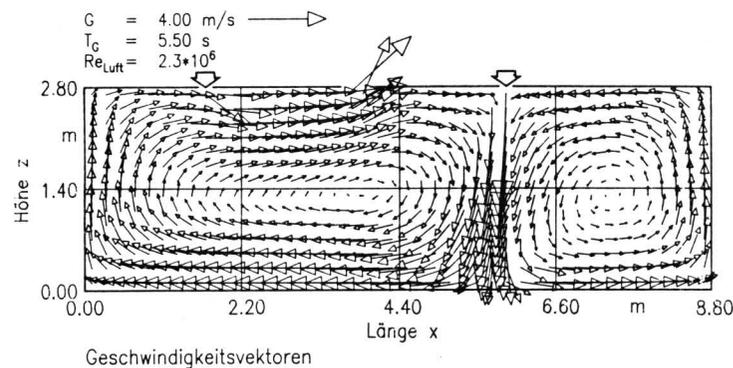


Bild 4. Geschwindigkeitsverteilung im Stallquerschnitt bei einer Absauggeschwindigkeit von $w = 4$ m/s.

Das dazugehörige Stromlinienbild, **Bild 5**, läßt erahnen, daß der kritische emissionsträchtige Bodenbereich auch vom konvektiven Transport erheblich beeinflusst wird. Die vorstehenden Ergebnisse sind mit Hilfe der numerischen Integration der Bewegungsgleichungen für den Luftbereich [40] nach der MAC-Methode erreicht worden [41]. Die zweidimensionale Strömungsberechnung im Stallquerschnitt läßt sich bei der Konstellation von Linienquellen und -senken rechtfertigen. Der mit Bild 1 vergleichbare reale Stall weist mehrere einzelne Überfirstentlüftungen auf, die nicht als Liniensenke bezüglich des Stallinnenraumes anzusehen sind. Hier ist es notwendig, auf dreidimensionale Strömungsberechnungen überzugehen [42 bis 45].

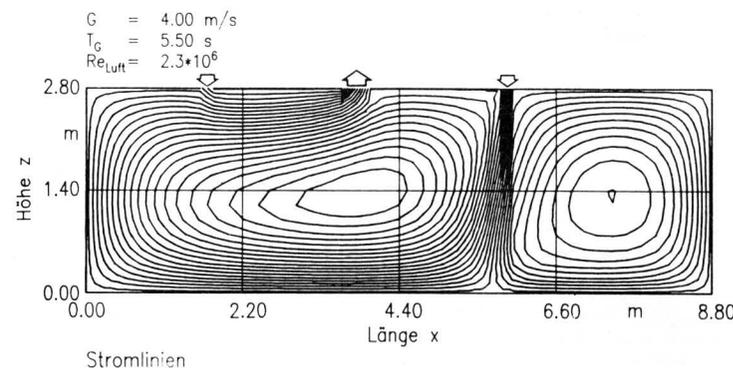


Bild 5. Stromlinienverteilung im Stallquerschnitt bei einer Absauggeschwindigkeit von $w = 4$ m/s.

2. Beschreibung des Systems "Stall"

Um eine Regelung für das Stallklima [9, 10, 46, 47, 48] aufzubauen, ist der Vorgang der "Tierhaltung" bzw. "Tieraufzucht" nach dem Schnittprinzip in ausreichend überschaubare Einzelabläufe zu zerlegen. Der Raum, in dem der Lufttransport stattfindet, ist eindeutig abgegrenzt. Er stellt im oberen Teil des Blockschaltbildes, **Bild 6**, die Regelstrecke dar.

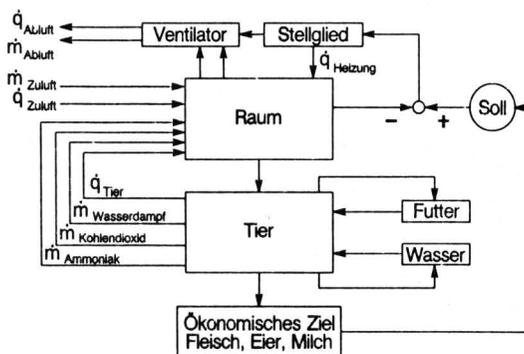


Bild 6. Klimaregelkreis für einen Stallbetrieb mit Sauglüftung.

Insgesamt ist die Tierhaltung so zu führen, daß langfristig die ökonomischen Ziele – z.B. Fleisch-, Eier- und Milchproduktion – optimal erreicht werden. Unterhalb dieser Ebene müssen für die Regelung weitere Regelgrößen herangezogen werden. Dabei spielen neben der Fütterungsstrategie, die hier nicht behandelt werden soll, die Wechselbeziehungen zwischen Tier und Stallklima für die Wahl der Klimasollwerte [26, 49 bis 54] die wichtigste Rolle.

Der Austausch zwischen dem Tier und seiner Umgebung erfolgt über Energie- und Massenströme [55 bis 59]. Eingetragen sind in Bild 6 für die Massenströme beispielhaft Wasserdampf, Kohlendioxid und Ammoniak, wobei Ammoniak aus den Ausscheidungsprodukten erst in einer Sekundärreaktion nach Verlassen des Tierkörpers entsteht. Sie stellen die Störgrößen dar, die auf die Regelstrecke "Raum" einwirken.

Es wäre wünschenswert, den Austausch zwischen Tier und Umgebung mathematisch eindeutig beschreiben zu können. Dann wäre gemäß **Bild 7** ein physiologisches Ersatzsystem einzuführen, das konkret die Tierreaktionen liefert, die für ein Regelsystem benötigt werden.

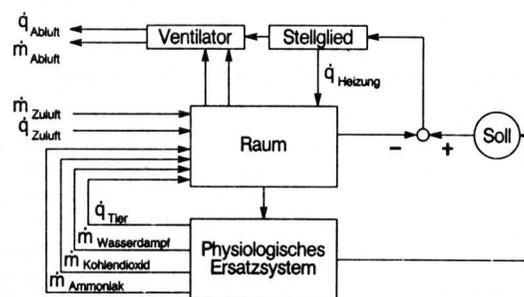


Bild 7. Regelkreis mit physiologischem Ersatzsystem für die Stallklimaregelung.

Ein physiologisches Ersatzsystem fehlt bislang; Ansätze für das "tierische Antwortverhalten" mit Blick auf das Wachstum in einem weiten Bereich von Eingangsbedingungen werden zunächst nur für Ratten, Zuchtbullen und Schafe [60] genannt. Bei den zur Mast gehaltenen Tieren gibt man sich, basierend auf empirisch ermittelten Wachstumsverläufen, im allgemeinen Temperatur- und Feuchtegradbereiche vor, die als annähernd optimal erachtet werden.

Für diese Bereiche interessiert im Rahmen dieser Arbeit besonders der Einfluß von Ammoniak, wozu allerdings nur globale Aussagen vorliegen. Konzentrationen unter 50 bis 75 ppm haben nur geringen Einfluß auf das Wachstum von Schweinen in der Endmast [61]. Bei Anwesenheit von 53 bis 71 ppm Ammoniak wird die Wärmeproduktion der Tiere um 4 % reduziert. Umfangreiche Untersuchungen von *Kliche* [13] bei Schweinezucht- und Schweinemastanlagen in sog. 24-h-Verlaufsmessungen mit einer Probenfrequenz von 2 h weisen Schwankungen von 0,1 bis 67 ppm an Ammoniak auf. Werte auf niedrigerem Niveau finden sich in [62, 63]. Abnorme physiologische Reaktionen werden nicht festgestellt. Zu diesem Ergebnis kommen auch *A.L. Sutton u.a.* [64], die Unbedenklichkeit bis 20 ppm konstatieren.

Folgt man dem Schrifttum, dann ist in dem üblichen Konzentrationsbereich bis 50 ppm in Schweineställen eine physiologisch als bedenklich einzustufende Reaktion der Tiere auf Ammoniak nicht gegeben. Ammoniak aus den stallinternen Quellen wird dann aber in der hier anstehenden Systembetrachtung mit seinen Gesamtemissionen allein zu einem Umweltproblem, nicht zu einem Gesundheitsproblem der Tiere. Daraus ergibt sich derzeit folgende Systemanforderung an eine Regelung: Vorzugebende Sollwerte für Temperatur und Feuchte im Stall sind so über die Ventilation herbeizuführen, daß die Ammoniakemissionen aus dem Stall minimal und die Konzentrationen im Tierbereich möglichst unter 50 ppm gehalten werden.

Um die Gesamtemission [65] zu ermitteln, sind die von den einzelnen stallinternen Quellen herrührenden Beiträge zu erfassen. Das Übergangsverhalten von Ammoniak [66, 67] aus der Gülle in die Stallluft über das Dampfdruckgefälle zu ermitteln, führt zu unbefriedigenden Ergebnissen [7].

Für Broiler-Stallungen wird von *H.A. Elliott* [68] ein Modell zur Quantifizierung der Ammoniakkonzentrationen genannt. Es ist strukturiert in die bakterielle Ammonifikation, d.h. die Ammoniakproduktion, den Stoffübergang in die Stallluft und die Ammoniakkontrolle durch Ventilation. Danach ist es außerordentlich schwierig vorauszusagen, wie der Feuchtegrad die Ammoniakkonzentration beeinflusst. Zur Verflüchtigung von Ammoniak aus der Gülle trägt in erster Linie der pH-Wert bei, dann die Temperatur, und der geringste Einfluß wird der Feuchte zugeschrieben.

Die Gesamtemission läßt sich aber auch über ein Modell bestimmen, das die Stoffaustauschraten zwischen den Kompartimenten Luft, Gülle, Boden und Tier aus Zeitreihen von Ammoniakkonzentrationen in der Stallluft ermittelt [15, 16]. War man bisher für die Quantifizierung dieses Modells auf vorliegende Konzentrationsangaben aus sehr unterschiedlich motivierten Messungen angewiesen, so ist nunmehr durch die computergestützte Sensortechnik die Möglichkeit zur gezielten Messung mit Differenzierung nach den stallinternen Emissionsquellen gegeben.

Beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse kann die Regelung – und das ihr zugrundeliegende physiologische Ersatzsystem – sich jedoch nur auf die Produktionsraten an Wärme, Wasserdampf und Kohlendioxid in Abhängigkeit von Tiergewicht und Temperatur [27, 28, 69] abstützen. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen Lüftungsrate und Gesamtemission sind erst noch in eingehenden Feldstudien zu klären. Dabei müssen neben aufwendigen Feldmessungen von Ammoniak im Stall Strömungssimulationen durchgeführt werden, die eine sinnvolle Variation in der Anordnung und Ausbildung von Abluft- und Zuluftöffnungen einbeziehen.

3. Ammoniakmessungen im System "Stall"

3.1 Eigenschaften von Ammoniak

Ammoniak wird im Stall bei der Zersetzung stickstoffhaltiger organischer Verbindungen von Kot und Harn gebildet. Ammoniak ist nicht als Leitsubstanz für Geruchsstoffe anzusehen; es ist aber von den Substanzen, die in ihrer stofflichen Zusammensetzung zu der Wirkung Geruch beitragen, am leichtesten zu messen.

Gasförmiges Ammoniak ist bei Raumtemperaturen beständig. Es weist eine relative Molekülmasse von 17,03 g/mol auf. Seine Dichte beträgt etwa 59 % der von Luft. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration ist auf 35 mg/m³ entsprechend einem Volumenverhältnis von 50 ppm festgelegt. Die maximale Immissionskonzentration beträgt 1/5 dieses Wertes. Angaben über Geruchsschwellenwerte differieren. Im Mittel geht man von 5 ppm aus. Der niedrigste Wert wird von *Thiele* [70] mit 2 mg/m³ bzw. 2,9 ppm angegeben.

Für unsere Untersuchungen im Stall von Bedeutung ist das Stoffübergangsverhalten von Ammoniak aus wäßrigen Lösungen. Die Lösungen reagieren alkalisch. Ammoniak wird von Wasser begierig aufgenommen. Die wäßrige Lösung enthält bei Sättigung 20 °C 34 Gewichtsprozent Ammoniak. Beim Erhitzen entweicht das "flüchtige Alkali" vollständig aus der wäßrigen Lösung.

3.2 Meßverfahren und -geräte für Ammoniak

Am verbreitetsten zum Nachweis von Ammoniak in der Gasphase sind feste Reagenzien in Form von Skalenröhrchen. Bromphenolblau dient als Redoxindikator für das in saure Umgebung gebrachte Ammoniak. Der Farbumschlag erfolgt von orange nach dunkelblau. Für kontinuierliche Messungen kommen diese Reaktionsröhrchen nicht in Frage.

Daneben gibt es für die Gasanalyse weitere Untersuchungstechniken, **Tafel 1.** Unter den Begriffen "Photometrie" oder "Kolorimetrie" faßt man diejenigen physikalisch-chemischen Untersuchungsmethoden zusammen, die sich mit der Messung der Lichtintensität beim Durchgang von Licht durch Materie befassen.

Man nutzt meßtechnisch das Absorptionsverhalten von Ammoniak gegenüber der Infrarotstrahlung. Ein Vergleichsstrahl erreicht durch ein nichtinfrarotaktives Gas eine Referenzmeßkammer, während ein durch das Meßgas geführter Strahl eine entsprechende Meßkammer geschwächt trifft. Die unterschiedlichen Strahlungsintensitäten führen zu unterschiedlichen Erwärmungen der Empfängerkammern, damit zu Druckdifferenzen. Diese bedingen eine meßbare Ausgleichsströmung zwischen den Kammern.

Bei den Leitfähigkeitsmessungen reagieren auf einer Reaktionsstrecke das Ammoniak als Meßgas und ein Reagens miteinander. Entsprechend der Konzentration von Ammoniak in dem Reagens ändert sich die elektrische Leitfähigkeit. Wir benutzen ein solches Gerät zur Kalibrierung der im Stallbereich eingesetzten Feldeffekttransistoren.

Meßverfahren	Meßprinzip	Bekannte Meßgeräte
Reaktionsröhrchen	Veränderung eines porösen Trägermaterials durch Reaktion mit dem Meßgas	Dräger- und Auer-Prüfröhrchen
Absorptionsphotometrie	Intensitätsänderung einer Strahlung infolge Absorption beim Meßgas	Ultramat, Uras, Lira
Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit	Leitfähigkeitsänderung eines Elektrolyten durch chemische Reaktion mit dem Meßgas	Picoflux, Mikrogas
Gassensitiver Feldeffekt	Veränderung der Einschaltspannung eines Transistors durch Diffusion des Meßgases in eine Elektrode	Sensistor AB

Tafel 1. Meßverfahren und -geräte zum Nachweis von Ammoniak.

Beim chemischen Sensor (Feldeffekttransistor) wird die Änderung des elektrischen Widerstandes eines Halbleiters im Kontakt mit dem Meßgas genutzt. So wird beim Feldeffekttransistor der Widerstand zwischen den Elektroden Source und Drain (Quelle und Senke) durch ein angelegtes Feld beeinflusst. Zur Bewirkung der Schaltfunktion wird nur eine Spannung aufgebracht; ein Steuerstrom muß nicht fließen. Beim Feldtransistor handelt es sich um einen unipolaren Transistor. Er nutzt eine Ladungsträgerart. Feldeffekttransistoren werden in MOS-Technik realisiert. MOS steht für metal oxid semiconductor. Bei diesem Halbleitertyp werden Metalloxide als Schichten auf Halbleiterkristalle, meist Siliziumdioxid, aufgetragen.

Das in der Mitte vom Bild 8 [71] zu sehende Gate hat dieselbe Wirkung wie das Gitter bei einer Triode. Die Triode ist eine Vakuumröhre, die außer der Kathode – vergleichbar mit dem Source-Kontakt (Emitter) – und Anode – vergleichbar mit dem Drain-Kontakt (Kollektor) – das sog. Gitter (Basis) – hier Gate genannt – als dritte Elektrode enthält. Bei der Triode wird der Anodenstrom – vergleichbar mit dem Strom I_d – weitgehend mit Hilfe des Gitters über die Gitterspannung V_g gesteuert.

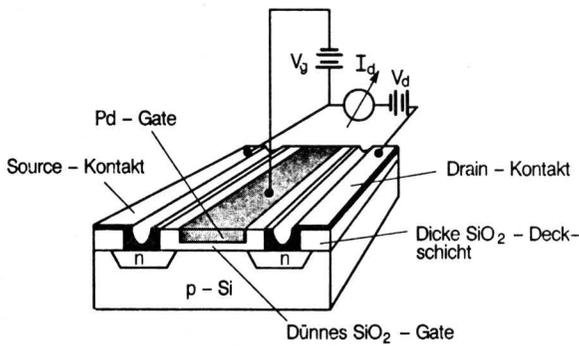


Bild 8. Wirkungsweise des Feldeffekttransistors, nach Göpel [71].

Die Steuerung dieser Gitterspannung macht das Wesen der strukturierten Halbleitersensoren aus. Bei der Wechselwirkung bestimmter Gasmoleküle mit Halbleiteroberflächen werden Elektronen zu bzw. abgeführt. Es kommt zu einer Änderung der Konzentration von freien Ladungsträgern im Halbleiter. Damit einher geht die Änderung der Leitfähigkeit. Das katalytisch wirkende Gatemetall ist mit einer Schicht elektrochemisch so modifiziert, daß es für bestimmte Gasmoleküle durchlässig wirkt und somit als chemischer Sensor fungiert.

Ein chemischer Sensor ist eine Meßeinrichtung, die einen chemischen Zustand als elektrisches Signal abbildet. Unter einem chemischen Zustand wird z.B. eine Konzentration C , ein Partialdruck, verstanden. Ein chemischer Sensor muß eine bestimmte chemische Verbindung innerhalb eines Gemisches ohne störende Querempfindlichkeiten gegenüber anderen Bestandteilen messen können.

Nimmt man zum Beispiel die Spannung U als elektrische Größe, dann kann dieses Meßsignal allgemein durch diverse andere Luftbeimengungen in den Konzentrationen C_1, C_2 und auch durch die Temperatur T beeinflusst werden:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial C_1} |_{C_{2,3,\dots}, T} dC_1 + \frac{\partial U}{\partial C_2} |_{C_{1,3,\dots}, T} dC_2 + \frac{\partial U}{\partial T} |_{C_{1,2,\dots}} dT \quad (7)$$

Bei einem Sensor für Ammoniakkonzentrationen C_1 sollte die partielle Ableitung nach C_1 in Gl. (7) dominant sein. Treten Querempfindlichkeiten auf, sind also die anderen partiellen Ableitungen noch relevant, kommt man von der Selektion zur Mustererkennung; anders ausgedrückt, das eigentliche Meßsignal wird von vielen sog. Schmutzeffekten überlagert. Im gegebenen Fall kann die Querempfindlichkeit gegenüber Schwefelwasserstoff eine Rolle

spielen. H_2S -Konzentrationen in Tierhaltungen sind im allgemeinen um eine Größenordnung kleiner als NH_3 -Konzentrationen [65]. Von daher dürfte der Einfluß von Schwefelwasserstoff klein sein. Da der chemische Sensor auf Wasserstoff anspricht, wird es zu einer additiven Überlagerung der Spannungsanzeigen kommen, so daß die Ammoniakkonzentrationen überhöht angezeigt werden. Die Querempfindlichkeit gegenüber Schwefelwasserstoff ist noch nicht ausreichend untersucht worden. Anders ist es mit dem Einfluß von Wasserdampf: hier ist keine signifikante Abhängigkeit festzustellen; eigene Klimakammertests bestätigen die Herstellerangaben.

Bei hoher Selektivität für Ammoniak, $C_1 = C$, gilt allgemein

$$dU = \frac{\partial U}{\partial C} dC \quad (8)$$

Zwischen der Konzentration C und der Spannungsdifferenz besteht eine exponentielle Abhängigkeit. Wird aus Dimensionsgründen $C_0 = 1$ ppm angenommen, so ist:

$$C = C_0 \left(\frac{U_0 - U}{K} \right)^m \quad (9)$$

Die Gl. (9) weist K und m als sog. Sensorparameter auf. Die Konzentration $C = 0$ liegt vor, wenn U den Wert der Referenzspannung U_0 annimmt, also die Spannungsdifferenz Null wird.

Ein relativer Fehler dC/C , der auf einen Fehler in der Spannungsangabe dU zurückzuführen ist, drückt sich näherungsweise durch die Beziehung:

$$\frac{\delta C}{C} \approx - \frac{m}{U_0 - U} \delta U \quad (10)$$

aus. Daraus ist zu folgern: m sollte möglichst klein, die Spannungsdifferenz möglichst groß sein. Die Spannungsdifferenz wird groß, wenn es gelingt, U_0 gegen Null zu bringen, z.B. durch sorgfältige Kalibrierung bei kleinen Konzentrationen.

3.3 Verwendeter Ammoniaksensor

Bei dem verwendeten Meßwertempfänger handelt es sich um einen sog. MOS-Feldeffekttransistor. Dieser besteht aus einem katalytisch wirkenden Metall und einem strukturierten Halbleiter. Das Meßprinzip beruht auf einer Änderung der Doppelschicht an der Halbleiter-Metall-Phasengrenze. Die Änderung ergibt sich durch Diffusion des Meßgases durch das Metall und seine Anreicherung an der Phasengrenze. Es entsteht eine Dipolschicht. Sie bewirkt eine meßbare Verschiebung der Schwellenspannung des Transistors in negative Richtung.

Bislang konnten diese Sensoren nur für den Nachweis von wasserstoffhaltigen Gasen eingesetzt werden. Als geeignet erweist sich das System Palladium/Siliziumdioxid. Weitere Metalle konnten nicht aufgefunden gemacht werden. Die Selektivität des Aufnehmers für Ammoniak wird nach Angaben des Herstellers durch eine sehr dünne auf dem Palladium aufgebraute Platinschicht erreicht. Bislang wurden bei uns fünf Sensoren dieses Types zum Einsatz gebracht.

In Abänderung der vom Hersteller verwendeten Sensorhalterung, wurde eine solche Konstruktion gewählt, die den Kontakt des Meßgases mit dem Sensor lediglich im Meßraum zuläßt. Halterungshohlräume in Sensorkopfnähe, die mit Ammoniak angereichert sind, können langfristig als Sekundärquellen fungieren. Es empfiehlt sich, als Halterungsmaterial Teflon zu verwenden.

Eine Nahaufnahme des Sensorkopfes (ϕ 5 mm) zeigt Bild 9. Die Kontaktfläche ist durch das kleine Rechteck in der Bildmitte umrissen. Der Sensor ist im Konzentrationsbereich 1–1000 ppm einsetzbar. Die Antwortzeit liegt unter 1 s, der Fehler im Konzentrationsbereich 4–500 ppm bei $\pm 10\%$ nach Herstellerangaben. Zunächst für die qualitative Messung (Überwachung bzgl. Leckagen) gedacht, müssen die Sensoren für die quantitative Messung im Stallbereich exakt kalibriert werden.

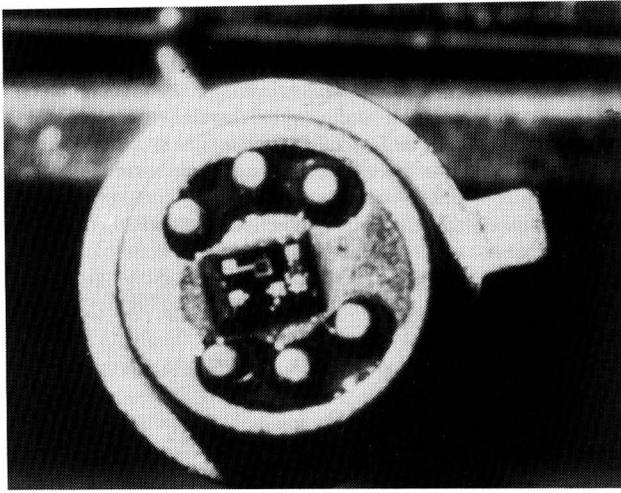


Bild 9. Ammoniaksensor (ϕ 5 mm) der Fa. Sensistor AB, Schweden.

Zur Kalibrierung der Sensoren wurde eine Testkammer mit bestimmten Ammoniakkonzentrationen beaufschlagt. Die Kalibrierungskurven in Bild 10 zeigen die exponentielle Abhängigkeit zwischen Spannungsdifferenz und Konzentration. Die Zunahme der Spannungsdifferenzen wird mit zunehmender Konzentration kleiner.

Mit den Kalibrierungsdaten lassen sich die Parameter im Spannungsansatz für die Konzentration Gl. (9) festlegen. Bei der gewählten Referenzspannung von $U_0 = 2000$ mV zeigen sich zwischen den einzelnen Sensoren deutliche Abweichungen. Jeder Sensor ist einzeln zu kalibrieren, wenn man zu reproduzierbaren Ergebnissen kommen will, Tafel 2.

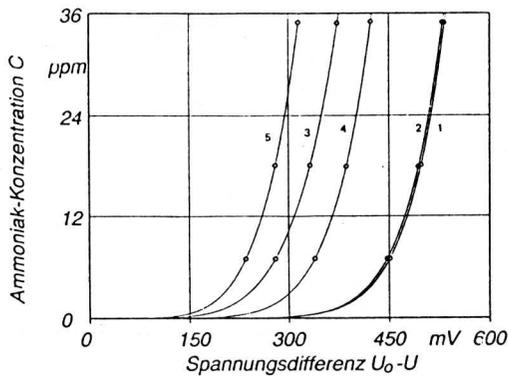


Bild 10. Ammoniakkonzentration als Funktion der Spannungsdifferenz $U - U_0$ bei $U_0 = 2000$ mV und Anpassung der Parameter K und m in Gl. (9) an die Kalibrierpunkte.

Sensor	m	K
1	9,627	368,57
2	9,450	363,91
3	5,607	198,00
4	7,270	259,39
5	5,570	166,48
Beispiel vom Hersteller	7,692	198,00

Tafel 2. Sensorparameter K und m bei Kalibrierung der Sensoren entsprechend der Beziehung $C = [(U_0 - U)/K]^m$; Bezugsspannung $U_0 = 2000$ mV.

3.4 Ammoniakmessungen im Stall

Konzentrationsmessungen wurden in einem Maststall und in einem Sauenstall der Versuchswirtschaften Relliehausen, Universität Göttingen, durchgeführt. Die Ställe weisen Vollspaltenboden auf. Die Anordnung der Sensoren in den Stallungen geht aus Bild 11 und 12 hervor. Im Maststall wurde mit der Sensorenanordnung a vom 26.7. bis 2.8.1989 und mit der Anordnung b vom 22.8. bis 12.9.1989 gemessen, im Sauenstall vom 15.8. bis 21.8.1989. Nach dem Jahresgang der Emissionen aus Tierhaltungen fällt der gesamte Meßzeitraum in den Bereich der höchsten Emissionen [5].

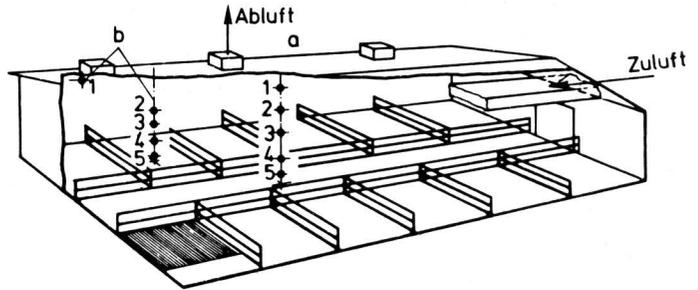


Bild 11. Meßanordnung im Maststall; Stallvolumen etwa 472 m³, 3 baugleiche Ventilatoren, Gesamtquerschnitt der Absaugöffnungen $1,08$ m², Tierbesatz $10,56$ GV.

Höhe der Meßörter in m:

	1	2	3	4	5
a	2,86	2,16	1,46	0,76	0,06
b	2,80	2,00	1,35	0,70	0,06

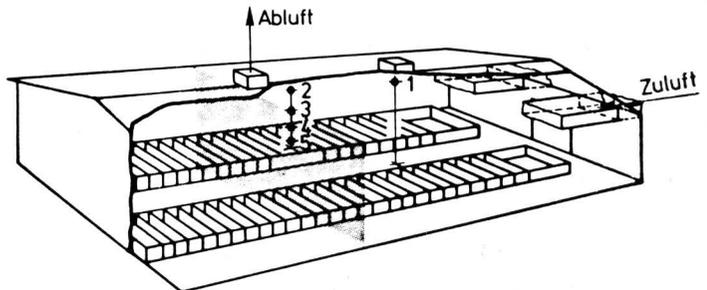


Bild 12. Meßanordnung im Sauenstall; Stallvolumen etwa 600 m³, 2 baugleiche Ventilatoren, Gesamtquerschnitt der Absaugöffnungen $0,72$ m², Tierbesatz $19,5$ GV.

Höhe der Meßörter:

1	2	3	4	5			
2,70 m	2,76 m	3	1,86 m	4	0,96 m	5	0,06 m

Die Abluftgeschwindigkeit wurde jeweils in einer Ansaugenebene der Ventilatoren im Stalldeckenbereich gemessen, Bild 13, wobei gemäß dem Trivialverfahren nach der VDI-Richtlinie 2080 [72] der Rechtecksquerschnitt des Ansaugkanals in gleich große Meßflächen eingeteilt wurde. Die mittlere Ansauggeschwindigkeit läßt sich durch Integration des Volumenstromes, bezogen auf den Ansaugquerschnitt, bestimmen.

Bei den Messungen der Ammoniakkonzentration sind ca. 10400 Einzelwerte registriert worden. In diesem Pilotprojekt wurde eine Abtastrate von 1 Wert pro 5 Minuten gewählt, um schon vor Ort mit den Datenmengen Untersuchungen auf einem PC durchführen zu können. Eine Abtastrate von 1 Wert pro Sekunde hätte auf 30 Millionen Konzentrationswerte geführt. Während das Pilotprojekt auf Untersuchungen von zwei Ställen beschränkt war, hat Oldenburg [21] eine Vielzahl von Stallsystemen untersucht. Zur Konzentrationsverteilung im Stall liegen von ihm aber keine Meßdaten vor. Die computergestützte Sensormeßtechnik erlaubt es nun, dieses Manko zu überwinden.

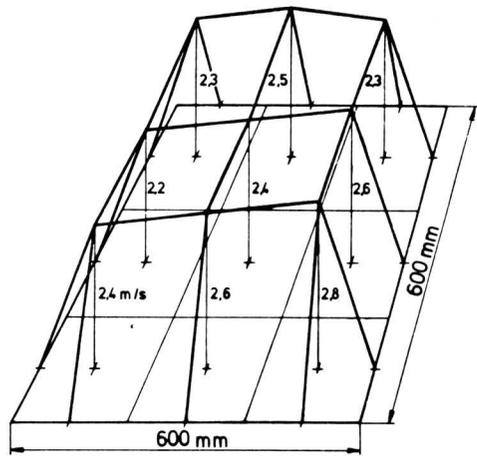


Bild 13. Geschwindigkeitsverteilung in der Ansaugenebene eines Ventilators im Maststall.

4. Meßergebnisse

4.1 Zeitverläufe

Daten von 37 Meßtagen stehen zur Interpretation der Geschehnisabläufe in den zwei untersuchten Ställen zur Verfügung. Interpretation heißt, daß man zunächst die Ergebnisse auf Plausibilität prüft. Anzustreben ist, aus der Datenfülle zu einer allgemein gültigen Informationsverdichtung zu kommen. Als Beispiel der Zeitreihenaufzeichnungen sind willkürlich zwei Meßtage im Maststall herausgegriffen, der 28.7.1989 und der 1.9.1989. Den Tagesgang der Außentemperaturen an diesen Tagen zeigt Bild 14. Die größte Temperaturdifferenz zwischen den beiden Tagen liegt mit etwa 10 °C in der Zeit von 15.00 bis 18.00 Uhr vor.

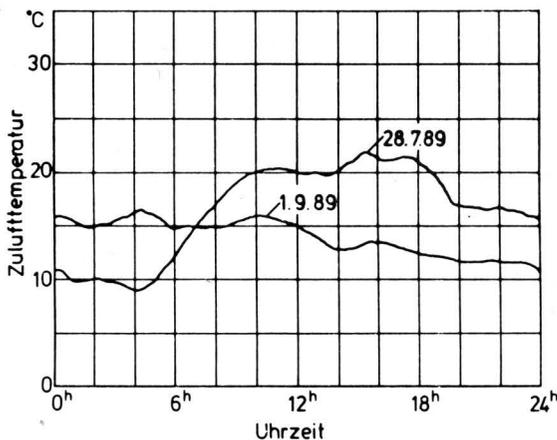


Bild 14. Tagesgang der Temperatur für die dem Stall von außen zugeführte Luft.

In Bild 15 ist das Meßprotokoll vom 28.7.1989 wiedergegeben. Dargestellt sind über der Uhrzeit die gemessenen Größen Konzentrationsverlauf, Trockentemperatur, Feuchtttemperatur, Luftgeschwindigkeit im Abluftschacht und die aus den Meßwerten abgeleiteten Größen relative Feuchte und spezifische Enthalpie.

Die Konzentrationsverläufe weisen jeweils beim Öffnen der Stalltüren gegen 7.00 und 14.00 Uhr deutliche Einbrüche auf. Die Konzentrationen sind am höchsten (oberste Kurve) im Bodenbereich. Sie erreichen dort maximal 15 ppm. Ansonsten liegen sie mit geringen Schwankungen deutlich unter 10 ppm.

Kontrollmessungen wurden vereinzelt mit Prüfröhrchen vorgenommen und bestätigten die Sensorergebnisse. Entsprechend dem geringeren Strömungswiderstand beim Öffnen der Tür zeigt die Luftgeschwindigkeit in diesen Zeitintervallen um 7.00 und 14.00 Uhr relative Maxima. Dabei kommt es durch Einströmen der Luft durch die Tür an der Stirnseite des Stalles statt durch die im Deckenbereich verlegten Zuluftkanäle auch zu einer Veränderung des Strömungsfeldes im Raum.

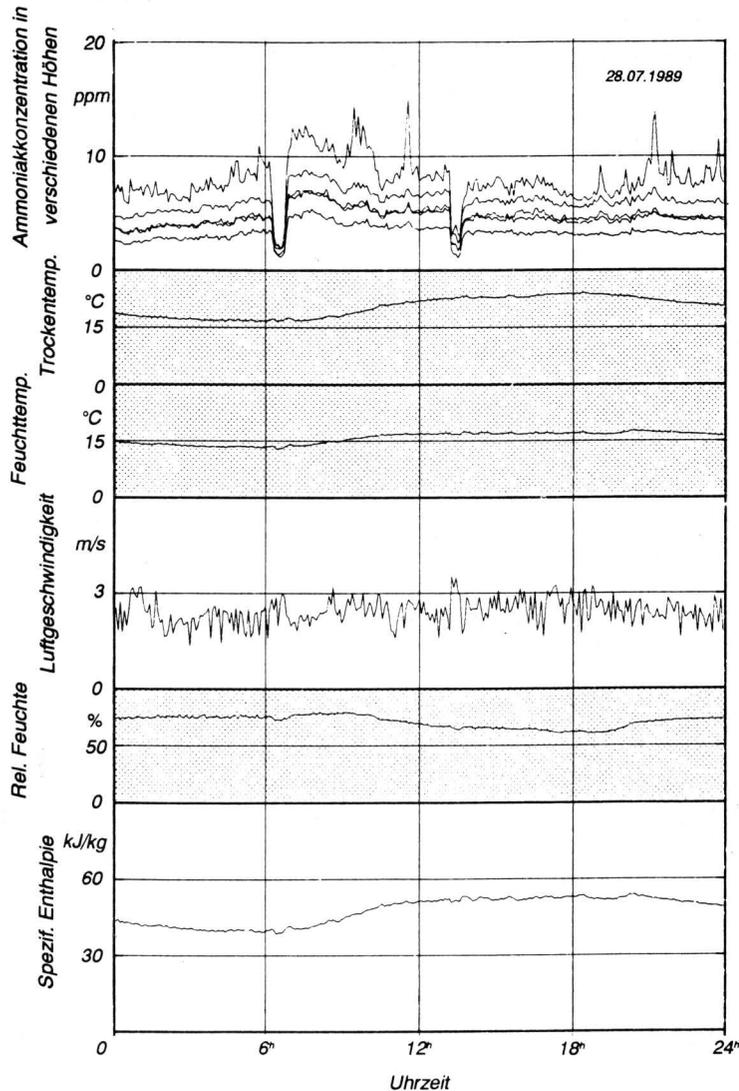


Bild 15. Zeitreihendarstellung der am 28.7.1989 gemessenen bzw. ermittelten Größen; Meßanordnung a.

Bild 16 zeigt das Meßprotokoll vom 1.9.1989 mit den schon bekannten Konzentrationseinbrüchen. Im Gegensatz zu Bild 15 verlaufen die Konzentrationen in den verschiedenen Höhen in sehr geringer Bandbreite um 10 ppm. Insgesamt ist das Konzentrationsniveau angestiegen. Die Luftgeschwindigkeit am Meßort ist deutlich niedriger als in Bild 15. Das läßt sich aus der deutlich niedrigeren Außenlufttemperatur (Bild 14) erklären, die allerdings durch Einstellen der Solltemperatur der Thermostatsteuerung auf nunmehr 18 °C (in Bild 15 25 °C) berücksichtigt wurde.

Die Absaugung ist vermindert. Die Luftbewegung ist gegenüber dem Zustand nach Bild 15 weniger raumgreifend, vgl. Bild 3 und 5. Es bildet sich ein gleichmäßigeres Konzentrationsfeld aus. Die Höhenabhängigkeit ist weniger ausgeprägt. Wenn zudem der abgeführte Volumenstrom reduziert ist, kann die Konzentration im Stall ansteigen. So lassen sich die unterschiedlichen Konzentrationsverläufe in den Bildern 15 und 16 plausibel erklären.

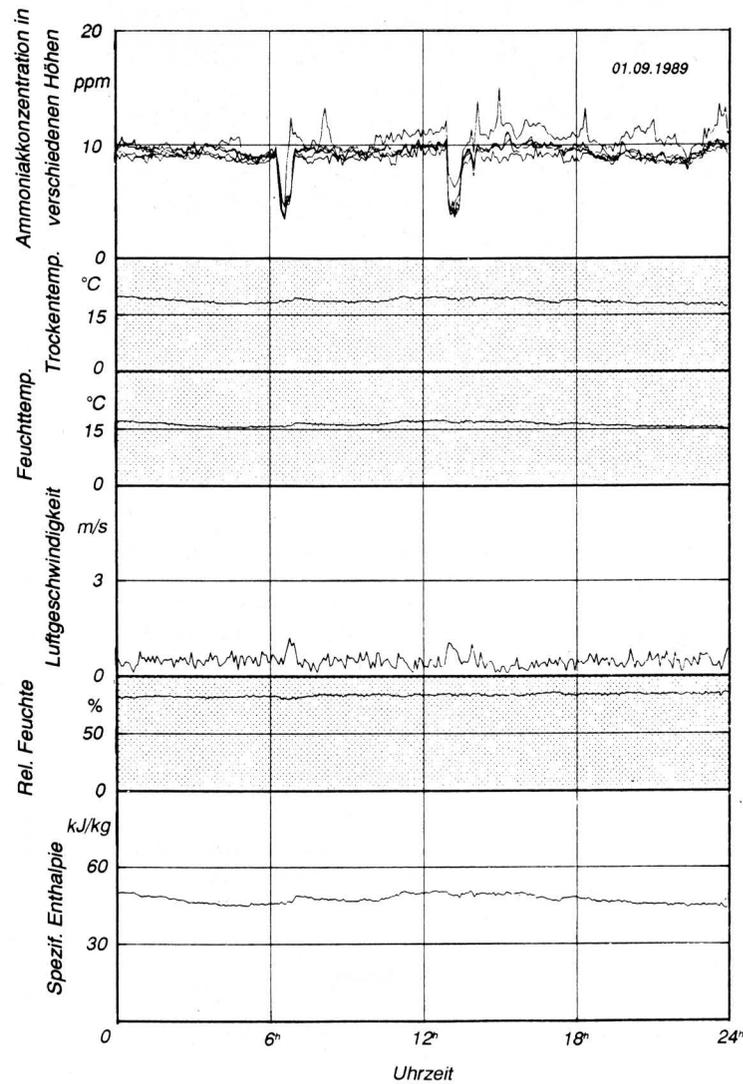


Bild 16. Zeitreihendarstellung der am 1.9.1989 gemessenen bzw. ermittelten Größen; Meßanordnung b.

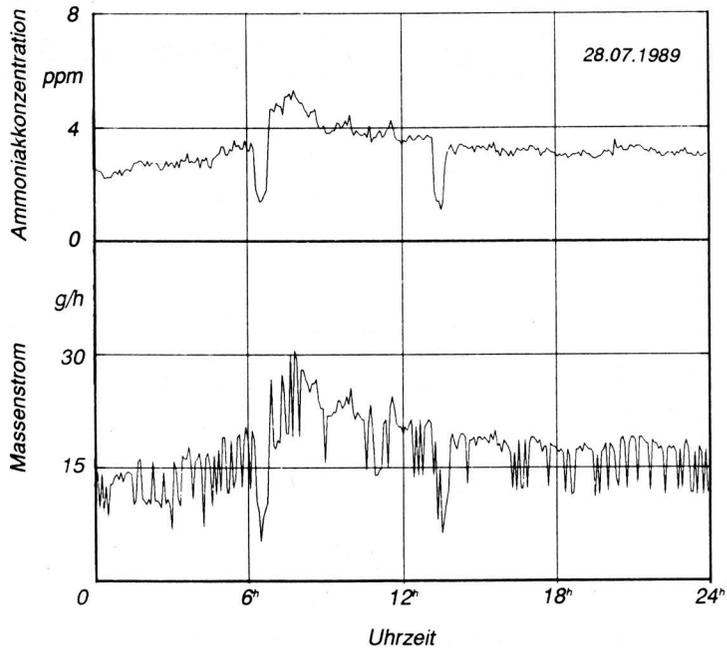


Bild 17. Zeitlicher Verlauf von Konzentration und Ammoniak-Massenstrom an der Schnittstelle Stall/Umwelt am 28.7.1989.

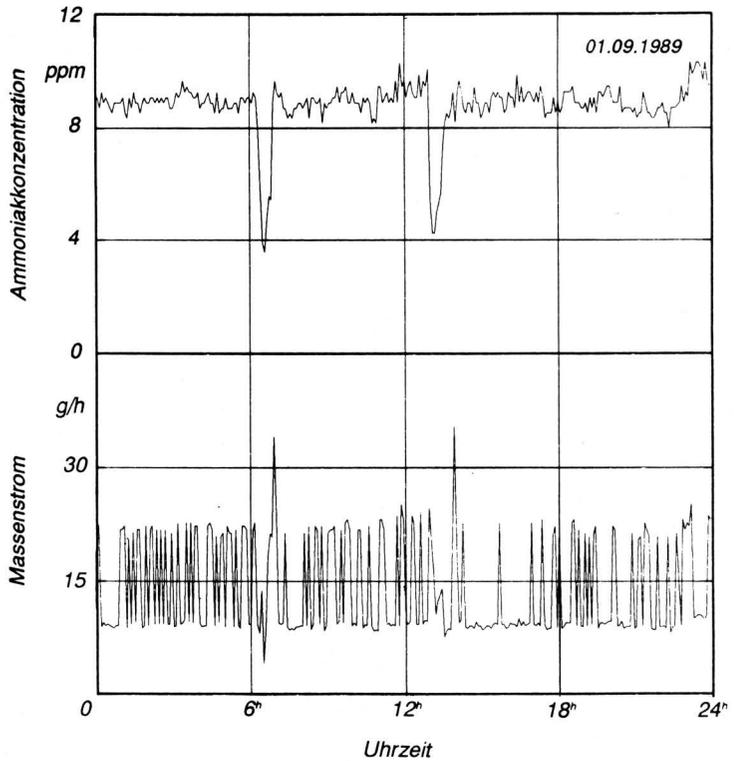


Bild 18. Zeitlicher Verlauf von Konzentration und Ammoniak-Massenstrom an der Schnittstelle Stall/Umwelt am 1.9.1989.

In **Bild 17 und 18** sind die Konzentrationsverläufe im Abluftschacht und die damit verbundenen Ammoniak-Massenströme nach Gl. (2) dargestellt. Obschon die Konzentration in **Bild 17** deutlich niedriger ist als in **Bild 18**, ist der emittierte Massenstrom in **Bild 17** deutlich höher als derjenige in **Bild 18**. Die für die Belastung der Umwelt relevante Größe ist aber der Massenstrom, gleichgültig ob es sich um die Bewertung von Ammoniakimmissionen oder Geruchsstoffimmissionen handelt.

Bei der Vorgabe von Sollwerten für die Klimaregelung sollte daher die Minimierung der Emissionsströme berücksichtigt werden. Da neben der Produktion von Ammoniak die Raumströmung für die Emissionen ausschlaggebend ist, bedeutet dieses, daß bei Einhaltung der tierphysiologisch bedingten Sollwerte für Temperatur und Feuchte die Strömungsfelder für die notwendigen unterschiedlichen Luftstraten zu optimieren sind. Dabei stellen verschiedene Formen des Stallaufbaus und die unterschiedliche Anordnung von Abluft- und insbesondere Zuluftöffnungen die wichtigsten Einflußgrößen dar.

4.2 Ortsabhängigkeiten

In dem Pilotversuch stand die Gleichzeitigkeit der Messung von Konzentrationen an verschiedenen Stellen des Stalles im Vordergrund. Bedingt durch die begrenzte Sensoranzahl, wurde mit Blick auf die Emissionsseite zunächst die Erfassung der Ammoniakkonzentrationen in verschiedenen Höhen im Stall betrieben.

Man sieht in **Bild 19** eine ausgeprägte Höhenabhängigkeit der Konzentrationen. Die Konzentrationen am 27.8.1989 nehmen nicht stetig vom Bodenbereich bis zur Decke ab. Auffallend ist im Bereich 0,8–1,5 m Höhe der Konzentrationsanstieg mit der Höhe während einer großen Zeitspanne der Messungen. Die Ergebnisdarstellungen vom 1.9.1989 in **Bild 20** weisen dieses Phänomen nicht auf. Da keine baulichen Veränderungen vorgenommen sind, erklären sich diese unterschiedlichen Konzentrationsprofile aus dem veränderten Strömungsfeld und dem anderen Ort (b) im Strömungsfeld.

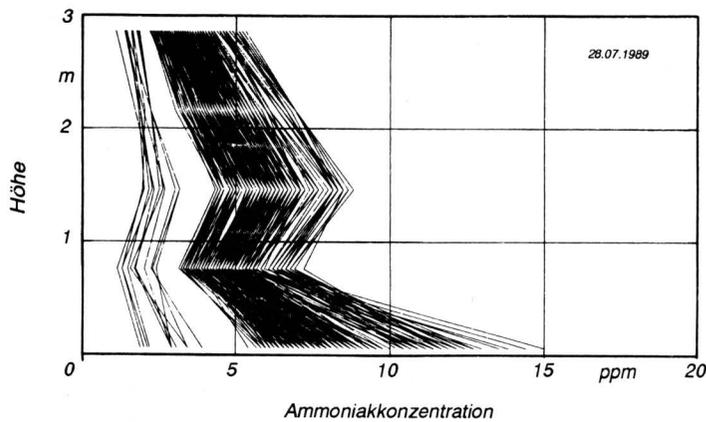


Bild 19. Konzentrationsverteilung über der Höhe; dargestellt sind alle Einzelmessungen vom 28.7.1989, Meßanordnung a.

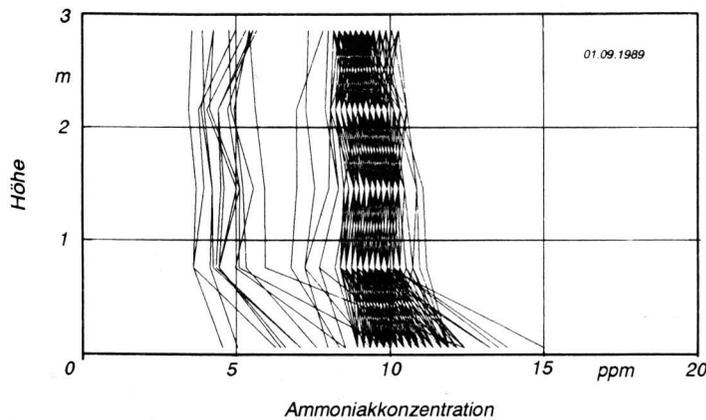


Bild 20. Konzentrationsverteilung über der Höhe; dargestellt sind alle Einzelmessungen vom 1.9.1989, Meßanordnung b.

Ausgehend von der Strömungssimulation (Bild 5), läßt sich mit bestimmten Annahmen für den Stoffübergang von Ammoniak aus den bodennahen stallinternen Quellen in die Luft auch die Konzentrationsverteilung von Ammoniak im Stall simulieren.

In Bild 21 ist die Konzentrationsverteilung in dem in Bild 1 gerasterten Querschnitt für eine Absauggeschwindigkeit von 4 m/s dargestellt. Für die Simulation sind im Bodenbereich der Buchten Linienquellen von Ammoniak mit einer fiktiven relativen Quellenkonzentration von 100 angenommen. Der Übergang von Ammoniak aus der festen bzw. flüssigen Phase in die Luft wird geschwindigkeitsproportional angesetzt. Diese Annahme wird gestützt auf Untersuchungen von *de Praetere u.a.* [73] in den in Belgien entwickelten "Slotted floor ventilation"-Systemen. Sie stellten fest, daß die Ammoniakkonzentration im Stallraum zwischen 11 und 26 ppm lag, wenn Luft über den unter Flur gelegenen Güllebereich geführt wurde, daß die Konzentration im Stallraum aber nur 2 bis 15 ppm erreichte, wenn das Einströmen von Luft in den Unterflurbereich zu einem großen Teil unterbunden wurde.

Die Linien gleicher Konzentration (Konzentrationsisoplethen) in Bild 21 weisen Bereiche aus, in denen vom Boden bis zur Decke kaum Veränderungen der Konzentration zu verzeichnen sind, während daneben mehrfache Konzentrationsänderungen auftreten. Zu beachten ist, daß dieses Bild die Verhältnisse nur grob qualitativ beschreibt, da die in Abschnitt 1 angesprochenen Diffusionskoeffizienten bei dieser Simulation noch nicht aufgrund von Konzentrationsmessungen kalibriert werden konnten.

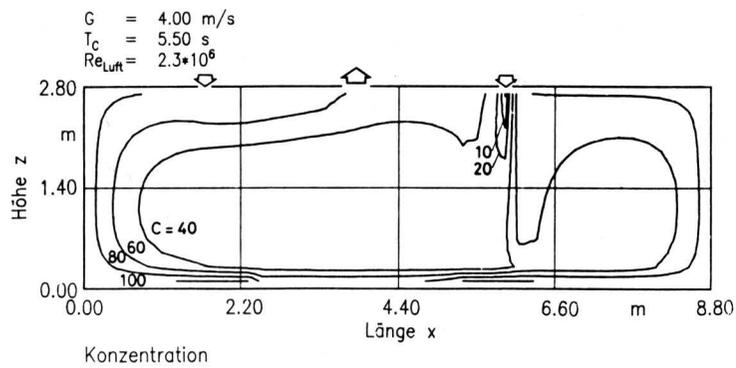


Bild 21. Linien gleicher Konzentration bei der Simulation einer Sauglüftung mit 4,0 m/s Ansauggeschwindigkeit.

Wenn es aber gelingt, die Simulation so weiterzuentwickeln, daß nach Ermittlung von Quellendaten im Stall die lokale Verteilung der Konzentrationen mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden kann, dann läßt sich ein solches Rechenmodell auch als Grundlage der Steuerung oder gar Regelung der Lüftung heranziehen und auf diesem Wege eine Optimierung der Lüftung bezüglich der Emissionsdaten an Ammoniak erreichen.

4.3 Mittelwerte

Zur Abschätzung der Gesamtemission werden im allgemeinen Mittelwerte der Konzentration herangezogen. In Bild 22 ist für die einzelnen Tage der Meßperiode vom 22.8. bis 12.9.1989 dargestellt, wie sich die Mittelwerte der Konzentration im Abluftschacht und des Massenstroms mit der Anzahl n der zugezogenen Meßdaten im Verlauf des Tages entwickeln. Bei $n = 1$ (die Meßwertaufnahme beginnt hier im allgemeinen um 0.00 Uhr) liegt lediglich ein Meßwert vor, bei z.B. $n = 200$ sind 200 Meßwerte berücksichtigt worden.

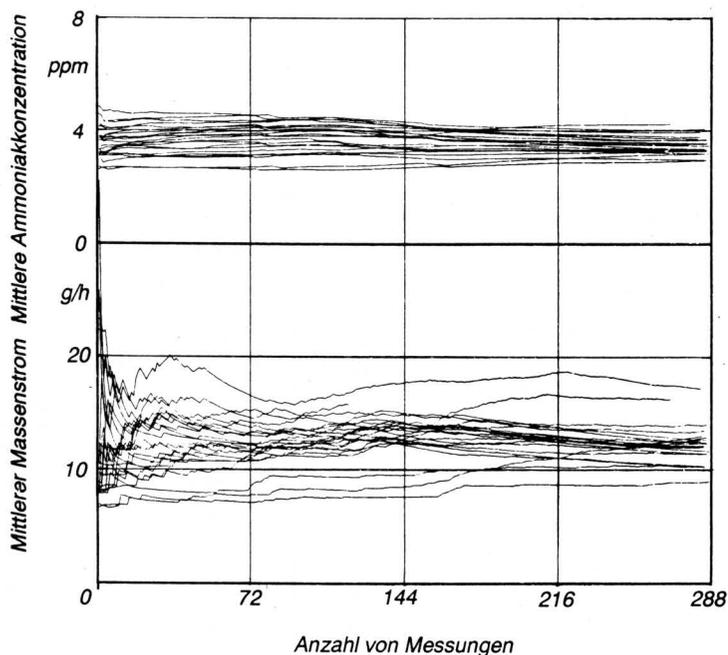


Bild 22. Mittelwerte der Konzentration und des Ammoniak-Massenstromes in Abhängigkeit von der Anzahl der Messungen für alle Einzeltage der Meßperiode vom 22.8. bis 12.9.1989; Meßbeginn im allgemeinen bei 0.00 Uhr.

Die Konzentrationen weisen ab 30 Meßdaten einen relativ stabilen Verlauf aus. Anders ist es bei dem Produkt aus der Konzentration und dem Volumenstrom, dem umweltrelevanten emittierten Massenstrom. Was hier als Mittelwert erfaßt wird, wäre bei Einzelmessungen dem Zufall überlassen. Die Tagesschwankungen werden mit zunehmender Meßdatenanzahl ausgeglichen. Ab 220 Messungen scheint sich zumindest in der hier vorgestellten Meßperiode ein Mittelwert herauszukristallisieren.

Da nicht jede Konzentration und jeder Abluftvolumenstrom kontinuierlich erfaßt werden kann, ist die Frage danach, wann denn mit herkömmlichen Meßapparaturen zu messen ist, um repräsentative Aussagen zu erhalten, verständlich, aber derzeit nicht zu beantworten. Für eine Hochrechnung des im Jahresablauf durchgesetzten Luftstromes sind aber zumindest die Häufigkeitsverteilungen zum Auftreten bestimmter Werte der spezifischen Enthalpie der Außenluft [74] zu berücksichtigen.

In **Tafel 3 bis 5** sind für die drei Meßperioden Tagesmittelwerte für Temperaturen und Konzentrationen aufgelistet. Die Ammoniakkonzentration ist im Abluftschacht (C_1) und im Bodenbe-

reich (C_5) angegeben. Die in den Tafeln genannten täglich emittierten Massen bzw. die auf die Großvieheinheit bezogenen Massenströme stellen die realen absoluten Emissionen dar.

Schaut man in die rechte Spalte der Tafel 5, so variiert der spezifische Ammoniakstrom im untersuchten Stall von 0,847 bis 1,600 g/(h GV). *Oldenburg* [21] nennt für die Endmast 3,44 g/(h GV), wobei dieser Wert aus mehreren Stalluntersuchungen rekrutiert. Bei hohen Luftraten, Tafel 3 und 4, ist das Konzentrationsgefälle vom Boden bis zur Stalldecke größer als bei geringen Luftraten, Tafel 5. Am 28.7.1989 lag die emittierte Masse an Ammoniak bei 406 g/d, am 1.9.1989 bei 334 g/d; der spezifische Ammoniakstrom betrug am 28.7.1989 1,6 g/(h GV), am 1.9.1989 dagegen 1,3 g/(h GV); die mittlere Konzentration im Abluftschacht ergibt für den 28.7.1989 den Wert von 3,2 ppm und am 1.9.1989 den Wert von 8,8 ppm. Daraus folgt, daß bei niedrigerer Konzentration mit hohem Abluftstrom mehr Masse an Ammoniak emittiert werden kann als im umgekehrten Fall bei hoher Konzentration und geringem Abluftvolumenstrom. Dieses besagt aber schon Gl. (2).

Datum 1989	Trocken- temperatur T °C		Spez. Enthalpie der Stallluft H kJ/kg	Ammoniak- konzentration ppm		Emittierte Ammoniak- masse M g/d	Emittierter spez. Ammoniak- strom \dot{M} g/h GV
	innen	außen		C_1 im Abluft- kanal	C_5 6 cm über Spalten- boden		
27.07.	22,3	17,8	46,7	2,5	7,5	304,3	1,201
28.07.	20,3	17,6	40,9	3,2	8,0	405,6	1,600
29.07.	21,4	20,7	43,2	2,9	7,1	373,8	1,475
30.07.	20,5	18,3	43,4	1,9	5,2	236,9	0,934
31.07.	18,4	13,9	39,0	2,1	5,7	271,7	1,072
01.08.	17,4	13,3	37,3	2,7	6,9	312,8	1,234
02.08.	16,9	11,9	36,5	2,7	6,6	128,7	1,091

Tafel 3. Tagesmittelwerte von Temperatur im Stall und in der Umgebung, Enthalpie, Ammoniakkonzentrationen, täglich emittierter Ammoniakmasse und emittiertem spezifischen Ammoniakstrom in der Versuchsperiode im Maststall vom 26.7. bis 2.8.1989; Tierbesatz 10,56 GV.

Datum 1989	Trocken- temperatur T °C		Spez. Enthalpie der Stallluft H kJ/kg	Ammoniak- konzentration ppm		Emittierte Ammoniak- masse M g/d	Emittierter spez. Ammoniak- strom \dot{M} g/h GV
	innen	außen		C_1 im Ab- luftkanal	C_5 6 cm über Spalten- boden		
16.08.	25,4	23,9	54,4	3,8	13,7	446,4	0,954
17.08.	24,1	18,2	49,7	2,9	11,9	342,2	0,731
18.08.	22,6	17,8	44,3	3,5	12,3	408,5	0,873
19.08.	22,6	20,9	43,8	3,8	11,5	369,2	0,789
20.08.	24,1	22,9	47,9	3,7	13,8	409,3	0,875
21.08.	25,1	24,1	49,7	5,7	14,2	296,7	0,654

Tafel 4. Tagesmittelwerte von Temperatur im Stall und in der Umgebung, Enthalpie, Ammoniakkonzentrationen, täglich emittierter Ammoniakmasse und emittiertem spezifischen Ammoniakstrom in der Versuchsperiode im Sauenstall vom 15.8. bis 21.8.1989; Tierbesatz 19,5 GV.

Datum 1989	Trocken- temperatur T		Spez. Enthalpie der Stallluft H kJ/kg	Ammoniak- konzentration		Emittierte Ammoniak- masse M g/d	Emittierter spez. Ammoniak- strom \dot{M} g/h GV
	°C			ppm			
	innen	außen		C ₁ im Ab- luftkanal	C ₅ 6 cm über Spaltenboden		
22.08.	25,8	22,0	53,0	8,3	9,3	242,3	0,956
23.08.	22,8	16,9	45,2	8,3	9,0	293,6	1,158
24.08.	21,2	17,5	42,9	7,4	8,1	243,7	0,962
25.08.	20,1	13,8	42,6	7,3	8,5	214,8	0,847
26.08.	18,3	14,4	38,3	8,3	9,3	245,0	0,967
27.08.	19,1	12,8	42,8	8,2	9,4	270,2	1,066
28.08.	17,2	10,6	37,5	10,5	11,5	365,2	1,441
29.08.	17,2	12,6	37,1	9,8	11,1	405,6	1,600
30.08.	17,6	14,3	37,4	9,1	11,6	295,5	1,166
31.08.	18,6	17,6	40,4	9,3	12,9	281,3	1,109
01.09.	18,6	13,6	42,2	8,8	10,3	333,9	1,317
02.09.	18,0	13,5	39,2	8,6	10,5	288,4	1,138
03.09.	17,7	11,9	37,9	9,2	11,3	306,5	1,209
04.09.	17,4	12,7	37,3	10,1	16,6	319,8	1,262
05.09.	17,6	14,1	36,9	9,4	13,4	295,5	1,166
06.09.	19,1	16,1	40,0	8,8	11,2	300,8	1,187
07.09.	20,2	18,1	43,7	8,2	11,2	271,9	1,073
08.09.	20,4	19,0	42,5	8,8	12,5	288,0	1,136
09.09.	20,6	17,5	42,8	8,2	11,8	286,5	1,130
10.09.	20,6	17,5	44,2	7,9	10,9	278,3	1,098
11.09.	20,4	14,9	43,9	7,9	10,3	308,2	1,216
12.09.	16,8	14,7	36,1	10,5	10,9	155,6	1,233

Tafel 5. Tagesmittelwerte von Temperatur im Stall und in der Umgebung, Enthalpie, Ammoniakkonzentrationen, täglich emittierter Ammoniakmasse und emittiertem spezifischen Ammoniakstrom in der Versuchsperiode im Maststall vom 22.8. bis 12.9.1989; Tierbesatz 10,56 GV.

Vergleicht man den gemessenen emittierten Gesamtmassestrom mit demjenigen, der sich aus dem Produkt der Tagesmittelwerte von Konzentration und Abluftvolumenstrom ergibt, dann ergeben sich Unterschiede, die im krasssten Fall am 21.8.1989 bei 23 % liegen. Hochrechnungen [24], die von Einzelwerterfassungen, verwiesen sei auf das Bild 22, ausgehen, ohne wenigstens die Häufigkeit verschiedener Abluftvolumenströme zu berücksichtigen, führen zu immensen Überschätzungen der Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung.

5. Aussichten

Die vorgestellte Sensortechnik erlaubt das simultane Messen von Konzentrationsfeldern in hoher zeitlicher Auflösung an verschiedenen Orten im Stall. Der gezielte Sensoreinsatz im Bodenbereich des Stalles dürfte zur Klärung der Fragen nach den unterschiedlichen Emissionsbeiträgen von der Gülle, vom Boden und vom Tier führen. Insbesondere das Stoffübergangsverhalten in das Kompartiment Stallluft könnte aufgeklärt werden.

Was die Entwicklung von Lüftungsstrategien im Stall anbelangt, so ist bereits im Institut für Biosystemtechnik der FAL ein Modellstall im Maßstab 1 : 10 für den Einsatz dieser Sensoren gebaut. Wässrige Ammoniaklösungen dienen vorerst als Gülleersatzsystem. In solchen Modellen lassen sich leicht Lüftungsvarianten experimentell testen, um die aufwendigen Versuche im Original-

stall zu begrenzen. Diese Varianten betreffen die unterschiedlichen Plazierungen der Ansaugöffnungen, wenn das Absaugen der Stallluft über deckenmittig verlaufende Absaugschächte erfolgt.

Die Sensortechnik ermöglicht das meßtechnische Eindringen in bisher kaum zugängliche Bereiche. Modellversuche dieser Art erfolgten 1969 von *Ifeadi* [75] mit gaschromatografischen Auswertungen; ein existierender Stall war im Maßstab 1 : 12 nachgebaut worden. Zur Probennahme wurde eine Gassonde in den Modellraum eingebracht, womit allerdings Kurzeitaussagen zur turbulenten Diffusion nicht möglich waren. Mit Hilfe der elektronischen Sensoren, die derzeit eine Abtastfrequenz von 1 Hz zulassen, ist man der meßtechnischen Erfassung der turbulenten Diffusion im Stall näher gekommen.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft –) vom 27.2.1986. GMBI. 7/86, S. 93/144.
- [2] VDI-Richtlinie 3471: Emissionsminderung Tierhaltung – Schweine. Berlin/Köln: Beuth-Verlag 1986.

- [3] *Licht, L.A. u. J.R. Miner*: A scrubber to reduce livestock confinement building odors. Trans. ASAE Bd. 22 (1979) S. 1152/56.
- [4] *Miner, J.R. u. R.C. Stroh*: Controlling feedlot surface odor emission rates by application of commercial products. Trans. ASAE Bd. 19 (1976) S. 533/38.
- [5] *Albright, L.D. u. G.W. Cole*: A procedure to estimate fan system duty factors. Trans. ASAE Bd. 23 (1980) S. 667/70.
- [6] *Albring, P.*: Modelluntersuchungen der Raumströmung bei Luftzufuhr durch Öffnungen in der Außenwand. Stadt- und Gebäudetechnik (1979) Nr. 2, S. 36/39.
- [7] *Anderson, G.A., R.J. Smith, D.S. Bundy u. E.G. Hammond*: Model to predict gaseous contaminants in swine confinement buildings. J. agric. Engng. Res. Bd. 37 (1987) S. 235/53.
- [8] *Cockroft, J.P. u. P. Robertson*: Ventilation of an enclosure through a single opening. Building and Environment Bd. 11 (1976) S. 29/35.
- [9] *Cole, G.W.*: The derivation and analysis of the differential equations for the air temperature of the confined animal housing system. Trans. ASAE Bd. 23 (1980) S. 712/20.
- [10] *Cole, G.W.*: A method to predict the performance of mechanically ventilated systems. Trans. ASAE Bd. 25 (1982) S. 419/24.
- [11] • *Hellickson, M.A. u. J.N. Walker*: Ventilation of agricultural structures. ASAE Monograph Nr. 6 (1983).
- [12] *Busse, F.W.*: Gutes Stallklima – was ist das? Landwirtschaftsblatt Weser-Ems Bd. 134 (1987) Nr. 9, S. 16/20.
- [13] *Kliche, R.*: Der Nachweis und die Bestimmung von Schadgasen und Geruchsstoffen in Tierproduktionsanlagen. Wiss. Z. Karl-Marx-Univ. Leipzig, Math.-Naturwiss. R., Bd. 29 (1980) Nr. 5, S. 449/61.
- [14] *Melhorn, G.*: Probleme der Lüfthygiene unter den Bedingungen der industriemäßigen Tierproduktion. Wiss. Z. Karl-Marx-Univ. Leipzig, Math.-Naturwiss. R., Bd. 29 (1980) Nr. 5, S. 437/48.
- [15] *Janssen, J.*: Mikroelektronische Stallklimatisierung zur Minderung von Stoffeinträgen in die Umwelt. VDI/MEG Kolloquium Landtechnik "Mikroelektronik in der Agrartechnik für den Umweltschutz", Heft 4 (1987).
- [16] *Janssen, J. u. K.-H. Krause*: Stallinterne Beeinflussung der Gesamtemission aus Tierhaltungen. Grundl. Landtechnik Bd. 37 (1987) Nr. 6, S. 213/20.
- [17] • *Kirschner, K. u.a.*: Klimatechnik in der Tierproduktion. Berlin, 1975.
- [18] *Rist, M., A. Durrer, Th. Keller u. Ch. Steingruber*: Stallklima und Entmistungsverfahren. Schweiz. Landw. Monatshefte Bd. 48 (1970) Nr. 11, S. 373/79.
- [19] *Erhorn, H. u. K. Gertis*: Mindestwärme oder/und Mindestluftwechsel. Gesundheits-Ingenieur – Haustechnik – Bauphysik – Umwelttechnik Bd. 107 (1987) Nr. 1, S. 12/14 u. 71/76.
- [20] *Hilliger, H.G., E. Isensee, J. Kalich, D. Smidt u. H.-F. Wolferrmann*: Stallklima und Geruchsbelastigung. Teil II. KTBL-Schrift 272, Darmstadt 1981.
- [21] *Oldenburg, J.*: Geruchs- und Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung. KTBL-Schrift 333, Darmstadt 1989.
- [22] *Zeisig, H.-D.*: Reduzierung von Ammoniakemissionen aus der Abluft von Intensiv-Tierhaltungen. Landtechnik, Sonderheft "Tierische Produktion" Bd. 44 (1989) S. 393/95.
- [23] *Hartung, J.*: Ammoniumgehalt des Regenwassers in der Umgebung eines Schweinemaststalles. V. Internationaler Kongreß für Tierhygiene, Hannover 10./13. September 1985, Bd. I, S. 660/64.
- [24] *Buijsman, E.*: Ammonia emission calculation – fiction and reality. S. 13/27. In: *Asman, W.A.H. u. S.M.A. Diederer* (Hrsg.): Ammonia and acidification Proceedings. Delft Juni 1987 (Symposium of the European Association for the Science of Air Pollution held at the National Institute of Public Health and Environment Hygiene, Bilthoven, 13./15. April 1987).
- [25] Bundesamt für Ernährung und Forstwirtschaft: Literaturstudie im Auftrag d. Bundesernährungsministeriums. BMELF-Info. Nr. 41, Bonn, Oktober 1989.
- [26] *Abshoff, A.*: Stallklimatechnik für Zucht- und Mast-schweine. Landtechnik Bd. 42 (1987) Nr. 7/8, S. 286/89.
- [27] *Schneider, B.*: Computergestützte kontinuierliche Erfassung der Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidproduktion in Nutztierställen. Diss. Univ. Hohenheim, 1988.
- [28] DIN 18910: Klima in geschlossenen Ställen. Berlin: Beuth-Vertrieb 1972.
- [29] *Seufert, H.*: Planungsgrundlagen zur Ausführung raumluft-technischer Anlagen. Landwirtschaftsblatt Weser-Ems Bd. 133 (1986) Nr. 23, S. 5/11.
- [30] *Franke, G.*: Umweltfreundliche Lüftung und Heizung von Schweineställen. Landwirtschaftsblatt Weser-Ems Bd. 135 (1988) Nr. 24, S. 12/15.
- [31] *Leuschner, P.*: Einsatz der Mikroelektronik bei der Stallklimatisierung. Landtechnik Bd. 41 (1986) Nr. 11, S. 485/87.
- [32] *Linke, W.*: Antriebsarten und Drehzahländerung bei Ventilatoren. Teil I: Strömungstechnische Voraussetzungen sowie Ventilator- und Motorbauarten. Heizung-Lüftung-Haustechnik (HLH) Bd. 33 (1982) Nr. 7, S. 267/72.
- [33] *Barber, E.M. u. J.R. Ogilvie*: Incomplete mixing in ventilated airspaces. Part I. Theoretical considerations. Can. Agr. Engng. Bd. 24 (1982) Nr. 1, S. 25/29.
- [34] *Barber, E.M. u. J.R. Ogilvie*: Incomplete mixing in ventilated airspaces. Part II. Scale model study. Can. Agr. Engng. Bd. 26 (1984) Nr. 2, S. 189/96.
- [35] *Barber, E.M. u. J.R. Ogilvie*: Interpretation of tracer gas experiments in ventilation research. J. agric. Engng. Res. Bd. 30 (1984) S. 57/63.
- [36] *Nouri, Z.*: Die Raumluftqualität – Bewertungsgrößen und Einfluß raumlufttechnischer Systeme. S. 249/57. VDI-Berichte Nr. 386, Düsseldorf: VDI-Verlag 1980.
- [37] *Leuschner, P.*: Klimatechnik für die Broilermast. Landtechnik Bd. 42 (1987) Nr. 7/8, S. 294/97.
- [38] *Moog, W.*: Dimensionierung von Luftführungssystemen. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 6 Nr. 49, Düsseldorf: VDI-Verlag 1978.
- [39] *Rolloos, M.*: Möglichkeiten der Vorausbestimmung von Strömungs- und Temperaturfeldern in großen Räumen. Heizung-Lüftung-Haustechnik (HLH) Bd. 29 (1978) Nr. 8, S. 302/12.
- [40] *Janssen, J. u. K.-H. Krause*: Numerical simulation of airflow on mechanically ventilated animal houses. ASHRAE Transactions: Building Systems – Room air and air contaminant distribution, (1989) S. 131/35.
- [41] *Sicilian, J.M. u. C.W. Hirt*: An efficient computation scheme for tracking contaminant concentrations in fluid flows. Journal Comput. Phys. Bd. 56 (1984) S. 428/47.
- [42] *Bottcher, R.W.*: Numerical calculation of flow driven by a ceiling fan. Trans. ASAE Bd. 30 (1987) Nr. 2, S. 476/84.

- [43] *Gosman, A.D., P.V. Nielsen, A. Restivo u. J.H. Whitelaw:* The flow properties of rooms with small ventilation openings. Journ. Fluids Engng. Bd. 102 (1980) S. 316/23.
- [44] *Kelly, T.G., V.A. Dodd u. D.J. Ruane:* Ventilation and air flow patterns in climatic calf houses. J. agric. Engng. Res. Bd. 33 (1986) S. 187/203.
- [45] *Kiel, D.E. u. D.J. Wilson:* Three-dimensional numerical simulation of turbulent airflow in a ventilated room by means of a two-equation model. ASHRAE Transactions 93, Teil 2 (1987) S. 1286/99, Paper NT-87-07-02.
- [46] *Cole, G.W.:* The application of control systems theory to the analysis of ventilated animal housing environments. Trans. ASAE Bd. 23 (1980) S. 431/36.
- [47] *Wauters, S.:* The use of expert systems as a different approach control of the climate in animal houses. In: *Dodd, V.A. u. P.M. Grace (Hrsg.):* Proceedings of the Eleventh International Congress on Agricultural Engineering (Dublin, 4./8. September 1989), Agricultural Buildings, Bd. 2 (1989) S. 1429/31.
- [48] *Zhang, G.:* Adaptive four-loop PID controller for climatic computer control of animal buildings. S. 1313/19. In: *Dodd, V.A. u. P.M. Grace (Hrsg.):* Proceedings, s. [47].
- [49] *Abshoff, A.:* Künstliche Kühlung von Schweineställen. KTBL-Schrift 175, Darmstadt 1973.
- [50] *Abshoff, A. u. F. Steimle:* Das biologische Klima im Kälberstall. Teil 1: Die Ansprüche des Kalbes an das Klima – präzisiert in physikalischen Größen. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 6, S. 161/68.
- [51] *Abshoff, A.:* Das biologische Klima im Kälberstall. Teil 2: Die geregelte Aufbereitung von Außenluft mit Wärme und Wasserdampf zu biologischer Stallluft. Grundl. Landtechnik Bd. 34 (1984) Nr. 5, S. 185/91.
- [52] *Abshoff, A.:* Die enthalpieorientierte Regelung der Stallluftströme. Deutsche Geflügelwirtschaft und Schweineproduktion Bd. 41 (1989) Nr. 26, S. 829/32.
- [53] *Buchmann, A.:* Stallklima ist mehr als Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Deutsche Geflügelwirtschaft und Schweineproduktion Bd. 30 (1988) Nr. 18, S. 516/21.
- [54] *Zhang, Y., E.M. Barber u. M. Bantle:* Development and interpretation of ventilation graphs for livestock buildings. S. 1449/56. In: *Dodd, V.A. u. P.M. Grace (Hrsg.):* Proceedings . . . s. [47].
- [55] *Clanton, C.J., C.B. Gilbertson, D.D. Schulte u. E.R. Peo:* Model for predicting the effect of nitrogen intake, body mass, and dietary calcium and phosphorus on manure nitrogen content. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 1, S. 208/14.
- [56] *Keller, T.:* Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidanfall in Schweinemast- und Hühnerställen. Diss. Nr. 7534 ETH Zürich, 1984.
- [57] *Randall, J.M.:* The prediction of airflow patterns in livestock buildings. J. agric. Engng. Res. Bd. 20 (1975) S. 199/215.
- [58] *Randall, J.M.:* Humidity and water vapour transfer in finishing piggeries. J. agric. Engng. Res. Bd. 28 (1983) S. 451/61.
- [59] *Sallvik, K. u. K. Walberg:* The effects of air velocity and temperature on the behaviour and growth of pigs. J. agric. Engng. Res. Bd. 30 (1984) S. 305/12.
- [60] *Bywater, A.C., J.W. Oltjen, R.L. Baldwin u. N.R. St.-Pierre:* Modelling animal growth. Mathematics and Computers in Simulation 30 (1988) S. 165/74.
- [61] *Scott, N.R., J.A. DeShazer u. W.L. Roller:* Effects of the thermal and gaseous environment on livestock. Monographs ASAE Publication (1983) S. 121/65.
- [62] *Burton, D.L. u. E.G. Beauchamp:* Nitrogen losses from swine housings. Agricultural Wastes Bd. 15 (1986) S. 59/74.
- [63] *Lebeda, D.L., D.L. Day u. T. Hayakawa:* Air pollutants in swine buildings with fluid waste handling. ASAE Paper No. 64-940, 1964.
- [64] *Sutton, A.L., J.R. Malayer, D.T. Diekman, D.D. Jones u. G.G. Long:* Effects of manure management and building environments on swine health and productivity. Trans. ASAE Bd. 30 (1987) Nr. 6, S. 1764/71.
- [65] *Vetter, H. u. H.H. Kowalewsky:* Untersuchungen über die Ausbreitung von Geruchsemissionen aus Schweine- und Hühnerhaltungsbetrieben. Abschlußbericht. Forschungsvorhaben 77 HS 47.
- [66] *McAllister, J.S. u. J.B. McQuitty:* Release of gases from slurry. Records of Agricultural Research 14 (1965) Nr. 2, S. 73/78.
- [67] *Muck, R.E. u. T.S. Steenhuis:* Nitrogen losses from manure storages. Agricultural Wastes 4 (1982) S. 41/54.
- [68] *Elliott, H.A. u. N.E. Collins:* Factors affecting ammonia release in broiler houses. Trans. ASAE Bd. 25 (1982) S. 413/18.
- [69] *Strøm, J.S. u. A. Feenstra:* Wärmeabgabe bei Rindern, Schweinen und Geflügel. KTBL-Arbeitspapier 69, Darmstadt 1980.
- [70] *Thiele, V.:* Messung von Gerüchen. Umwelt Nr. 1/2 (1987) S. M101/M111.
- [71] *Göpel, W.:* Entwicklung chemischer Sensoren: Empirische Kunst oder systematische Forschung? Technisches Messen tm, Bd. 52 (1985) Nr. 2.
- [72] *VDI-Richtlinie 2080:* Meßverfahren und Meßgeräte für raumlufttechnische Anlagen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984.
- [73] *Praetere, De K. u. W. Van Der Biest:* Airflow patterns and their relation to ammonia distribution. S. 1457/64. In: *Dodd, V.A. u. P.M. Grace (Hrsg.):* Proceedings . . . s. [47].
- [74] *Janssen, J. u. F. Schoedder:* Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 3, S. 81/90.
- [75] *Ifeadi, C.N.:* Ventilation systems for controlling gases produced in swine confined housing. Diss. Univ. of Nebraska, 1969.