

# Messen und Rechnen in der Landtechnik

Die wissenschaftlich-technische Revolution hat auf dem Gebiet der Mechanisierung der Landwirtschaft nicht nur die Produktionsmittel grundsätzlich verändert, sondern auch in der landtechnischen Forschung die Forschungsmethodik wesentlich beeinflusst. Einsatz elektronischer Meßverfahren, Modellierungen mit Hilfe von EDV-Anlagen und Anwendung radioaktiver Nuklide gehören zu den Arbeitsmitteln des modernen landtechnischen Wissenschaftlers.

Auf einer Fachtagung am 22. und 23. Mai 1974 wird im Institut für Mechanisierung der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR in Potsdam-Bornim in etwa 40 Vorträgen und Referaten zu den Themenkreisen

- Kennwerte landwirtschaftlicher Materialien
- Modellierung landtechnischer Vorgänge und Prozesse
- Kraft- und Wegmessungen
- Dichtemessungen
- Verteilungsmessungen
- Automatisierung von Teilprozessen
- Informationssystem zur Produktionskontrolle

ein Ausschnitt aus der Arbeit auf diesem neueren Gebiet der landtechnischen Forschung gegeben.

Dabei wird neben der Darstellung der fachbezogenen methodischen Fragen durch das Objekt der Untersuchungen die praxisbezogene Anwendung dieser neuen wissenschaftlichen Verfahren für die weitere Intensivierung der sozialistischen Landwirtschaft deutlich.

Der Erfahrungsaustausch mit Wissenschaftlern aus den befreundeten sozialistischen Ländern, insbesondere der UdSSR, und mit Praktikern und Wissenschaftlern aus der Republik auf dieser Fachtagung wird zur Steigerung der Effektivität der wissenschaftlichen Forschung durch zweckmäßige Anwendung moderner Arbeitsmethoden beitragen.

Die folgenden Beiträge vermitteln einen Einblick in die letzten drei Themenkomplexe, der allerdings an dieser Stelle nicht umfassend sein kann. Die Veröffentlichungen werden in weiteren Heften fortgesetzt.

## Untersuchung des Luft- und Gasaustausches in landwirtschaftlichen Produktionsanlagen

Dr. rer. nat. H. Rettig, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

### 1. Aufgabe

Anlagen der tierischen und pflanzlichen Produktion werden klimatisiert, um den Ablauf der biologischen Prozesse optimal zu gestalten. Klimagrößen, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Konzentration bestimmter Schadgase, sind in den einzelnen Raumbereichen jeweils innerhalb vorgegebener Grenzen konstant zu halten. Bei der großen Flächenausdehnung landwirtschaftlicher Produktionsanlagen kann diese Forderung nur durch eine sorgfältige Auslegung der Lüftungssysteme realisiert werden. Für die Schaffung von Grundlagen zur Projektierung sind umfangreiche Klimamessungen erforderlich, und es ist der die Klimatisierung eigentlich bewirkende Luftaustausch im freien Raum zu untersuchen.

In Lagerhäusern müssen bei einer hohen Raumerfüllung die genannten Grenzwerte der Klimagrößen an den Oberflächen des eingelagerten biologischen Materials aufrechterhalten werden. Voraussetzung dafür ist gleicher Luftaustausch in allen Raumbereichen. Sie ist auch zu erfüllen, wenn der Erfolg der Trocknung landwirtschaftlicher Schüttgüter durch Belüftung gewährleistet sein soll. Zur Bewertung von Be- und Entlüftungsanordnungen reicht es nicht aus, die Qualitätsveränderungen des Gutes allein zu betrachten, sondern es ist der Luftaustausch — die Luftführung und -geschwindigkeit — in den mit Gut gefüllten Räumen zu untersuchen.

Beim Gärprozeß muß Schüttgut unter anaeroben Bedingungen gelagert werden, um zusätzliche Konservierungsverluste zu vermeiden. Voraussetzung dafür ist minimaler Gasaustausch zwischen dem Porenvolumen und der Atmosphäre. Zur Bewertung der Gasdichtheit von Konservierungsbehältern und Zudeckmaterialien sowie zur Bewertung von Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie z. B. Verdichten des Siliergutes, sind Untersuchungen zum Gasaustausch erforderlich.

In den vergangenen Jahren wurden im Institut für Mechanisierung den jeweiligen Erfordernissen der landtechnischen

Forschung entsprechend methodische Voraussetzungen für die Untersuchung des Luft- und Gasaustausches mit radioaktiv markierten Indikatoren in landwirtschaftlichen Produktionsanlagen geschaffen [1/ 2/ 3/ 4/ 5/ 6/]. Das beinhaltet die Entwicklung von Modellvorstellungen, die Auswahl geeigneter Indikatoren, die Anpassung von Meßgeräten sowie die praktische Erprobung und Einführung der Meßverfahren.

Als Aufgabe wurde gestellt, den erreichten methodischen Stand an typischen Anwendungsbeispielen darzustellen.

### 2. Modellvorstellungen und Meßverfahren

Zur mathematischen Beschreibung des Luftaustausches kann das Verweilzeitmodell des idealen kontinuierlichen Mischers auf klimatisierte landwirtschaftliche Produktionsanlagen übertragen werden. Die Anlagen sind dadurch charakterisiert, daß eine in einem kleinen Zeitintervall zugeführte Indikatormenge sofort über die gesamte im Volumen befindliche Luft gleichmäßig verteilt wird. Infolge des Austausches nimmt die Indikatorkonzentration  $c$  von einem Anfangswert  $c_0$  exponentiell als Funktion der Zeit  $t$  ab

$$c = c_0 \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

Der Faktor  $\alpha$  im Exponenten, die Luftwechsellzahl, gibt an, wie oft je Zeiteinheit das Luftvolumen  $V$  der Anlage ausgetauscht wird; sein Kehrwert stellt die mittlere Aufenthaltszeit  $\bar{t}$  des Indikators in der Anlage dar

$$\bar{t} = 1/\alpha \quad (2)$$

Aus dem Produkt der Luftwechsellzahl  $\alpha$  und dem Volumen  $V$  berechnet sich die Austauschrate  $\dot{V}$  bzw. der Luftdurchsatz zu

$$\dot{V} = \alpha V \quad (3)$$

In klimatisierten Anlagen kann auf diese Weise der projektierte Luftdurchsatz mit dem unter den gegebenen Einbau-

bedingungen der Lüfter praktisch erreichbaren verglichen werden.

Das Modell des idealen kontinuierlichen Mischers ist auch auf die Baukörper von Konservierungsbehältern übertragbar. Als Maß für deren quantitative Bewertung eignet sich die Durchlässigkeit  $D'$ . Sie berechnet sich aus der Austauschrate  $\dot{V}$  und der Fläche  $A$ , über die sich der Austausch vollzieht, zu

$$D' = \dot{V}/A \quad (4)$$

Der mathematischen Beschreibung des Gasaustausches zwischen dem Porenvolumen landwirtschaftlicher Schüttgüter und der Atmosphäre sind Diffusionsmodelle zugrunde zu legen. Sie sind dadurch charakterisiert, daß eine während eines kleinen Zeitintervalls in das Porenvolumen zugeführte Indikatormenge erst nach Ablauf eines inneren Austauschvorganges exponentiell als Funktion der Zeit abnimmt. Der Exponent  $\alpha$  hängt über den Diffusionskoeffizienten  $D_0$  von den Eigenschaften des Indikatorgases, über den Diffusionswiderstandsfaktor  $\mu$  von den Eigenschaften des Schüttgutes und von den Abmessungen  $l$  der Behälter ab.

Bei zylindrischen Behältern der Höhe  $l$  und freier Oberfläche ist die Abhängigkeit durch

$$\alpha = (\pi/2l)^2 D_0/\mu \quad (5)$$

gegeben.

Zur mathematischen Beschreibung der Strömung von Gasen werden das Rührstufenmodell als Hintereinanderschaltung idealer kontinuierlicher Mischer sowie ein- oder zweidimensionale Diffusionsmodelle verwendet. Mit ihnen lassen sich Kenngrößen wie die Rührstufenzahl oder die Bodensteinzahl definieren und die Abweichungen von den Grenzfällen — dem idealen kontinuierlichen Mischer oder dem idealen Strömungsrohr — quantitativ bewerten [7/ 8/]. Von Bedeutung ist eine derartige Bewertung des Strömungsverhaltens von Gasen in Anlagen, wenn gleichzeitig der Ablauf eines durch sie beeinflussten Prozesses, z. B. der Trocknung, untersucht wird.

Als Indikator für die Untersuchung des Luft- bzw. Gasaustausches hat sich das radioaktive Edelgasnuklid Kr-85 bewährt. In den zu untersuchenden Anlagen wird das Indikatorgas im allgemeinen stoßförmig freigesetzt. Für seine Freisetzung im Porenvolumen landwirtschaftlicher Schüttgüter sind spezielle Sonden erforderlich. Diese Sonden gestatten es gleichzeitig, die Indikatorkonzentration zu messen. Als Detektoren werden Zählrohre in robuster Ausführungsform verwendet. Die Registrierung der von den Detektoren angezeigten Impulsraten erfolgt digital; eine direkte Übertragung auf Lochstreifen ist möglich.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Impulsraten werden über eine logarithmische Regressionsrechnung die Exponenten  $\alpha$  ermittelt. Eine quantitative Prüfung der zugrundegelegten Modelle ergab im allgemeinen Bestimmtheitsmaße  $B > 0,9$  für die Übereinstimmung mit den vorausgesetzten exponentiellen Abhängigkeiten. Der Variationskoeffizient  $V_2$  des Exponenten des Luft- bzw. Gasaustausches kann im Mittel für den Bereich  $5 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1} \leq \alpha \leq 10^4 \text{ h}^{-1}$  zu  $V_2 = 5$  Prozent abgeschätzt werden (Bild 1).

### 3. Anwendungsbeispiele

Voraussetzung für den Erfolg einer Klimatisierung von landwirtschaftlichen Produktionsanlagen sind gleiche Luftwechselzahlen in allen Raumbereichen. Diese Voraussetzung muß durch geeignete Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen erfüllt werden. Durch Messung der Luftwechselzahlen in verschiedenen Raumbereichen von Anlagen kann auf die Wirksamkeit von Belüftungssystemen geschlossen werden. In mit verschiedenen Lüftungssystemen ausgerüsteten Aufzucht- bzw. Mastställen für Broilerkaninchen der Abmessungen  $80 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$  wurden mit dieser Fragestellung Luftwechselzahlen parallel an fünf über die Diagonale

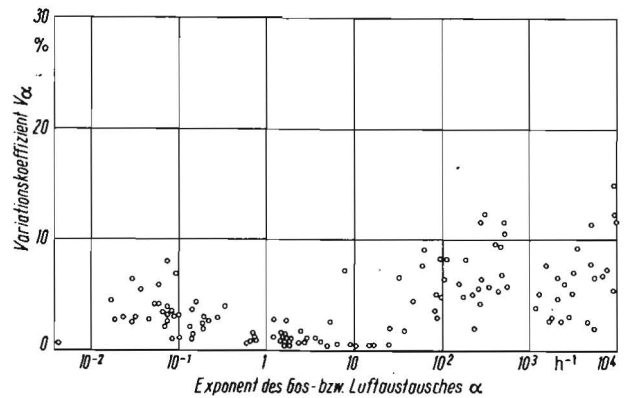


Bild 1. Fehler der Meßverfahren; der Variationskoeffizient wurde an rd. 100 ausgewählten zeitlichen Verläufen der Indikatorkonzentration durch Regressionsrechnung bestimmt

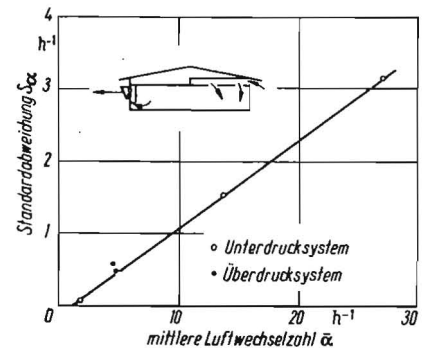


Bild 2. Schwankungsbreite des Luftwechsels in einzelnen Raumbereichen von Mast- und Aufzuchtställen für Broiler-Kaninchen als Funktion der mittleren Luftwechselzahl

verteilten Meßorten gemessen [9/]. Als Maß für die Schwankungen des Luftwechsels innerhalb des Stallraums wird die Standardabweichung der gemessenen Einzelwerte angesehen; sie nimmt mit wachsender mittlerer Luftwechselzahl  $\bar{\alpha}$  zu (Bild 2). Soll die Schwankungsbreite der Einzelwerte in dem Bereich der mittleren Luftwechselzahl unter einem vorgegebenen Grenzwert bleiben, muß das bereits bei der Projektierung, z. B. durch verbesserte Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen oder durch Erhöhung ihrer Anzahl berücksichtigt werden.

Eine weitere Voraussetzung für den Erfolg einer Klimatisierung besteht darin, im Aufenthaltsbereich der Tiere oder in Güllekanälen entstehende Schadgase so abzuleiten — dazu werden für Stallanlagen zusätzlich Absaugsysteme projektiert — daß sie mit der einströmenden Frischluft nicht vermischt werden können. Lüftungssysteme sind danach zu bewerten, inwieweit diese Forderung praktisch realisiert wird.

In einem Kälberstall mit den Abmessungen  $15,5 \text{ m} \times 5,8 \text{ m} \times 3,4 \text{ m}$  wurde diese Aufgabe gelöst, indem nach stoßförmiger Freisetzung definierter Indikatormengen jeweils an den Entstehungsorten für Schadgase die entsprechenden zeitlichen Verläufe der Indikatorkonzentrationen im Stallraum miteinander verglichen wurden [10/ (Bild 3)]. Die Bewertung bautechnischer Maßnahmen zur Einschränkung des Gasaustausches an Konservierungsbehältern erfordert vergleichende Untersuchungen der Gasdurchlässigkeit. Die unter praktischen Bedingungen gemessenen Durchlässigkeiten überdecken mit  $D' = 10^{-1} \dots 10^4 \text{ l/m}^2 \text{ h}$  einen Bereich von fünf Größenordnungen. Die untere Grenze gilt

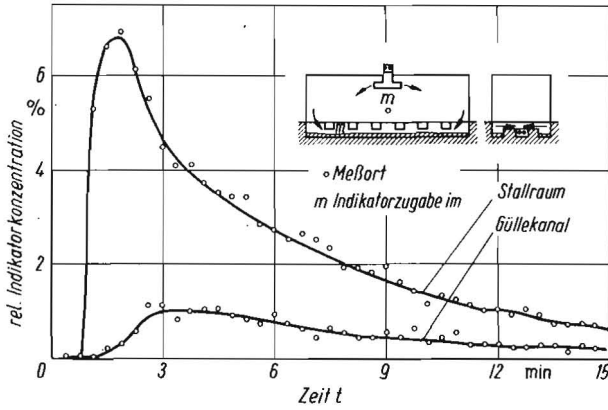


Bild 3. Relative Indikatorkonzentration als Funktion der Zeit in einem Kälberstall nach stoßförmiger Freisetzung jeweils der gleichen Indikatormenge in den Stallraum bzw. in den Güllekanal. Das Verhältnis der Flächen unter den Ausgleichskurven gibt an, welcher Anteil des Indikators (Schadgas) aus dem Güllekanal wieder in den Stallraum gelangt und damit nicht vom Absaugsystem erfaßt wird. Im dargestellten Beispiel beträgt der Anteil rd. 25 Prozent

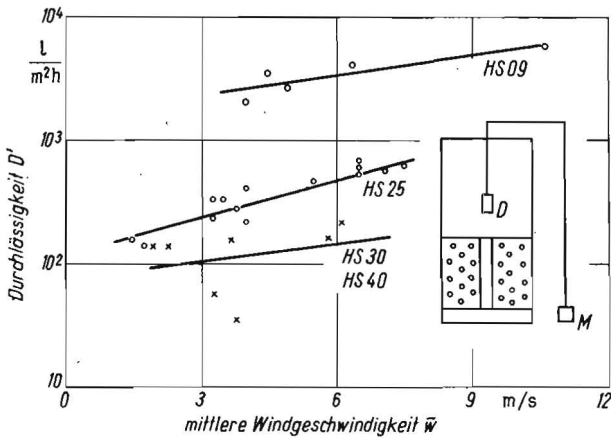


Bild 4. Durchlässigkeit großvolumiger Konservierungsbehälter als Funktion der mittleren Windgeschwindigkeit; D Detektor, M Meßplatz

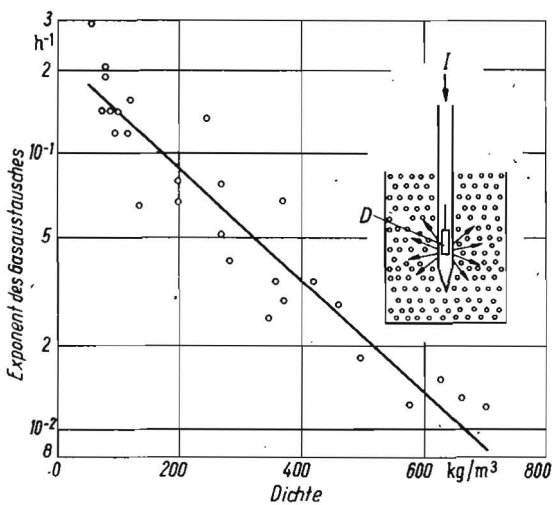


Bild 5. Exponent des Gasaustausches an zylindrischen Preßkörpern mit einer freien Grenzfläche als Funktion der Dichte,  $V = 0,7 \text{ m}^3$ ; Schüttgut: Stroh, Siliergut (Gras, Klee, Futterroggen); D Detektor, I Indikator

für Bilanzbehälter, die obere wird von unzureichend abgedichteten großvolumigen Konservierungsbehältern erreicht ( $V \approx 10^3 \text{ m}^3$ ). An derartigen Behältern, z. B. an den Formsteinsilotypen HS 09 und HS 25 sowie an den monolithischen Versuchsbehältern HS 30 und HS 40, wird die Durchlässigkeit erheblich von meteorologischen Bedingungen beeinflusst /11/ (Bild 4).

Die Forderung, anaerobe Bedingungen in Konservierungsbehältern allein durch Reduzierung ihrer Gasdurchlässigkeit zu schaffen, ist praktisch nicht erfüllbar. Auch die Bewirtschaftungsmaßnahmen müssen dazu beitragen, den Gasaustausch einzuschränken. Aus den Ergebnissen von Untersuchungen des Gasaustausches zwischen dem Porenvolumen und der Atmosphäre an unterschiedlich verdichtetem Siliergut mit freier Oberfläche wurden für den Verfahrensschritt Befüllung Grenzwerte der technologisch und ökonomisch bedeutsamen Füllhöhe je Tag berechnet /11/ (Bild 5):

In Boxpaletten eingelagerte Kartoffeln werden indirekt belüftet. Die Frischluft strömt lediglich durch die Spalten und Zwischenräume des Palettenstapels und nicht durch die Kartoffelschüttung selbst, wie das bei zwangsbelüfteten Hauflagern der Fall ist. Das Belüftungssystem muß die Frischluft so verteilen, daß sie den Palettenstapel gleichmäßig verteilt durchströmt. Die Paletten sind unter Berücksichtigung der Eigenschaften des eingelagerten Gutes so auszuführen, daß der Luftaustausch gewährleistet ist. Untersuchungen wurden an Boxpaletten mit einem Fassungsvermögen von 0,75 t Kartoffeln durchgeführt und Abhängigkeiten der Luftwechselzahl von der Luftgeschwindigkeit, von Temperaturdifferenzen zur Umgebung sowie von der Fraktionszusammensetzung nachgewiesen /6/ (Bild 6).

#### 4. Zusammenfassung

Anhand typischer Beispiele wird der erreichte methodische Stand dargestellt. Mit den entwickelten Meßverfahren können Exponenten des Luft- bzw. Gasaustausches im Bereich  $\alpha = 10^{-3} \dots 10^4 \text{ h}^{-1}$  in klimatisierten Ställen, Konservierungsbehältern, verdichtetem Siliergut und belüfteten Boxpaletten für landwirtschaftliche Schüttgüter untersucht werden. Diese Untersuchungen erlauben differenzierte Aussagen über Belüftungssysteme sowie über bautechnische Veränderungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen an Konservierungsbehältern.

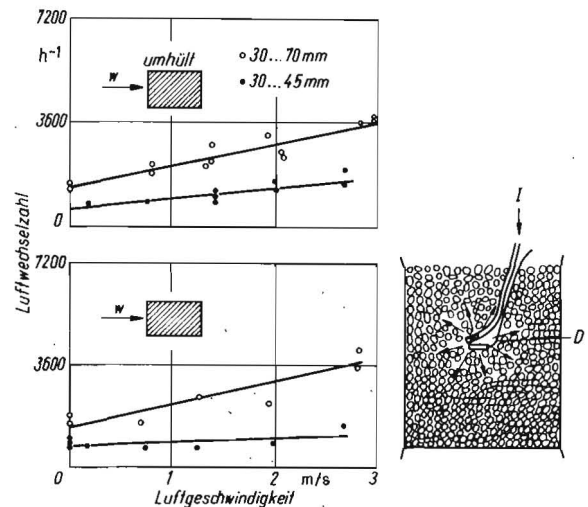


Bild 6. Exponent des Luftaustausches an mit Kartoffeln gefüllten Boxpaletten Typ „Cobbelsdorf“ als Funktion der äußeren Luftgeschwindigkeit, Parameter Fraktionszusammensetzung; D Detektor, I Indikator

## Literatur

- 1/ Beer, M. / A. Heißner / G. Vogel: Bestimmung des Luftaustausches im geschlossenen Gewächshaus aus Glas oder glasfaserverstärktem Polyester. Dt. Agrartechnik 15 (1965) H. 4, S. 166—170.
- 2/ Maltry, W.: Messungen an landwirtschaftlichen Belüftungsanlagen mittels radioaktiver Nuklide. Wiss. Zeitschr. d. TU Dresden 16 (1967) H. 4, S. 1119—1122.
- 3/ Beer, M. / W. Helbig / H. Rettig: Bewegungsuntersuchungen mit radioaktiv markierten Stoffen. Dt. Agrartechnik 18 (1968) H. 6, S. 304—305.
- 4/ Rettig, H. / G. Suckow: Bestimmung des Gasaustausches an Gärfutterbehältern. Dt. Agrartechnik 20 (1970) H. 10, S. 477—479.
- 5/ Helbig, W. / E. Scherping: Messungen der Teilchengeschwindigkeit in Rohrleitungen von Fördergebläsen. Dt. Agrartechnik 20 (1970) H. 10, S. 469—471.
- 6/ Rettig, H. / E. Kuhn / H.-G. Kirschbaum: Bestimmung von Luftwechsellzahlen in Boxpaletten. Dt. Agrartechnik 22 (1972) H. 7, S. 323—325.
- 7/ Pippel, W.: Bestimmung der Rührstufenzahl aus mit radioaktiven Nukliden gemessenen Verweilzeitspektren. Isotopenpraxis 2 (1966) H. 3, S. 136—140.
- 8/ van Krewelen, W.: Fortschritte in den Kenntnissen der technischen Reaktionsführung. Chem.-Ing.-Techn. 30 (1958), Nr. 9, S. 553 bis 559.
- 9/ Rettig, H.: Luftwechsellzahlmessung in landwirtschaftlichen Produktionsanlagen. Untersuchungsbericht IfM 1970.
- 10/ Fuchs, H.: Luftwechsellzahlmessungen in der Kälberaufzuchtanlage der LPG „Karl Marx“ Neekes. Untersuchungsbericht IfM 1973.
- 11/ Rettig, H.: Untersuchung des physikalischen Gasaustausches an Konservierungsbehältern. Diss. AdL Berlin 1973. A 9484

# Verweilzeitmessungen an Lüftungstechnischen Modellen

Dipl.-Ing. H.-J. Müller, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

## 1. Aufgabenstellung

Die Beherrschung des Stallklimas, das einen hohen Einfluß auf die tierische Leistung ausübt, gewinnt bei der Anwendung industriemäßiger Produktionsmethoden immer mehr an Bedeutung.

Aufgabe der Klimagegestaltung ist, für jede Tierart die geforderten Klimaparameter

- Temperatur
  - relative Feuchtigkeit
  - Schadstoffkonzentration
  - Geschwindigkeit
- zu gewährleisten.

Aufgrund von an sich bekannten Bilanzrechnungen lassen sich Frischluftförderstrom, Heizleistung und Wasserbedarf (z. B. für Befeuchtung) berechnen /1/. Bei diesen Berechnungen wird vorausgesetzt, daß sich die zugeführte Luft (Zuluft) im Stall ideal mit der Stallluft vermischt.

Diese ideale Durchmischung wird in der Praxis nicht erreicht. Das bedeutet, daß in den Stallanlagen die bei der Berechnung angenommenen Klimaparameter im Tierbereich nicht eingehalten werden.

Wie gut sich die Zuluft mit der Stallluft vermischt, hängt von der Luftführung bzw. von der Raumströmung ab.

Die gemessenen klimatischen Verhältnisse in Praxisanlagen zeigen, daß diese Fragen der Luftführung noch nicht umfassend beherrscht werden. Es sind Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet notwendig, um entsprechende Berechnungsgrundlagen für die Projektierung zu erarbeiten.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder sind folgende Gleichungen:

### Verwendete Formelzeichen

c	Vol-%	Konzentration
c <sub>0</sub>	Vol-%	Anfangskonzentration
l	m	Länge
i	$\frac{\text{kgm}}{\text{h}^2}$	Impulsstrom des Strahls
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Frischluftstrom
V	m <sup>3</sup>	Raumvolumen
w <sub>ab</sub>	m/s	Abluftgeschwindigkeit
w <sub>zu</sub>	m/s	Zuluftgeschwindigkeit
$\alpha$	h <sup>-1</sup>	Luftwechsellkoeffizient
t	s	Zeit

- Kontinuitätsgleichung
- Bewegungsgleichung
- Gleichung des Wärmetransportes
- Gleichung des Stofftransportes

Die bei der Stalllüftung auftretenden Randbedingungen lassen eine rein analytische Lösung z. Z. nicht zu. Deshalb muß auf dem Gebiet der Raumströmung auf das Experiment zurückgegriffen werden.

Untersuchungen in Praxisanlagen erfordern einen hohen Aufwand an Zeit und Material. Sie können daher nur in beschränktem Umfang durchgeführt werden. Modellversuche haben den Vorteil, daß sie mit geringem Zeit- und Materialaufwand angestellt werden können. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Modell auf die Großausführung muß gewährleistet sein.

Im IfM Potsdam-Bornim wurde ein Modellversuchsstand eingerichtet, der den Bedingungen des Stallbaus entspricht und verallgemeinerungsfähige Schlußfolgerungen zuläßt.

## 2. Meßmethode

Die Raumströmung bestimmt wesentlich die Güte des Stallklimas. Sie ist eine Überlagerung von natürlichen (thermische Strömungen) und erzwungenen (Zuluftstrahlen) Luftbewegungen. An dieser Luftbewegung nehmen Dämpfe, Gase, Wärme und feinste Staubteilchen teil. Es bilden sich Temperatur-, Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder aus.

Zur Untersuchung der genannten Transportvorgänge eignet sich die Indikatorermethode. Sie beruht darauf, daß die Luft durch ein Indikatorgas stoß- oder sprungförmig markiert und die Konzentration dieses Gases in Abhängigkeit von der Zeit an interessierenden Stellen gemessen wird.

Die Konzentration fällt exponentiell als Funktion der Zeit ab, setzt man ideale Durchmischung des Raums voraus, d. h. wendet man das Modell des idealen kontinuierlichen Mischers an.

$$c = c_0 \exp(-\alpha t)$$

Der Faktor im Exponenten wird als Luftwechsellkoeffizient bezeichnet. Er berechnet sich aus dem Frischluftstrom  $\dot{V}$  und dem Volumen V:

$$\alpha = \frac{\dot{V}}{V}$$

In Analogie zur Regelungstechnik stellt der ideale kontinuierliche Mischer ein Verzögerungsglied 1. Ordnung mit der Zeitkonstante  $1/\alpha$  dar.