

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Januar 1972

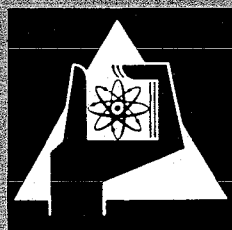
KFK 1524

Labor für Isotopentechnik

**Die Technik der Luftwechselbestimmung mit radioaktivem Krypton-85
und ihre Anwendung auf Untersuchungen in Ställen**

K. Göttling, H. Domberg, H. Vogg

H. G. Hilliger
(Institut für Vet.-Hyg. der Freien Universität Berlin)



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE



Die Technik der Luftwechselbestimmung mit radioaktivem Krypton-85 und ihre Anwendung auf Untersuchungen in Ställen

Von K. GÖTTLING, H. DOMBERG, H. G. HILLIGER, H. VOGG

Aus dem Labor. f. Isotopentechn. d. Ges. f. Kernforschung mbH, Karlsruhe (Göttling, Domberg, Vogg) und dem Inst. f. Vet.-Hyg. d. Fr. Univ. Berlin (Hilliger)

Die Aufrechterhaltung lufthygienischer Verhältnisse in Stallungen zwingt zu ständiger Lüfterneuerung. Die Stalllüftung hat dabei die Aufgabe, die von den Tieren gebildeten Wärme-, Wasserdampf- und Kohlendioxidmengen abzuführen. Die Qualität der Stallluft wird davon entscheidend mitbestimmt und verbessert. Kürzlich wurden erste Angaben über Wasserdampf- und Kohlendioxidbildung in modernen Schweine- und Legehennenställen veröffentlicht [1], die mit Hilfe der Luftwechselbestimmung mittels der Tracergasmethode mit Krypton-85 ermittelt worden waren. Die Technik dieser Luftwechselbestimmung soll im folgenden näher beschrieben werden.

1. Allgemeine Grundlagen

Die Tracergastechnik zur Bestimmung des Luftwechsels ist bereits 1858 durch *Pettenkofer* [2] eingeführt worden. Bei diesem Verfahren wird ein Tracer als Meßgas der zu wechselnden Luft zugemischt und seine Konzentrationsabnahme mit der Zeit registriert. Zwischen der Konzentrationsänderung pro Zeiteinheit und dem Luftwechsel besteht eine als *Seidelsche Formel* bekannte rechnerische Beziehung [3].

$$LW = \frac{2,303}{t} \cdot \log \frac{C_1}{C_2} [h^{-1}]$$

Hierbei bedeuten:

LW = Luftwechsel in h^{-1}

C_1 = Tracergaskonzentration zur Zeit t_1

C_2 = Tracergaskonzentration zur Zeit t_2

t_2 = Versuchszeit t_1 bis t_2 in h

Die Wahl des Tracers soll so erfolgen, daß Eingriffe in das bestehende Lüftungssystem weitgehend vermieden werden und die Konzentration ohne großen Aufwand möglichst

genau ermittelt werden kann. Gase, die von den Wänden und Einbauten adsorbiert werden oder chemisch mit ihnen reagieren, verfälschen das Ergebnis und sollten daher nicht verwendet werden. Die Dichte des Prüfgases soll in der Größenordnung der Luftdichte liegen, um ein homogenes Luft-Tracergas-Gemisch zu erhalten und ein mögliches Entmischen zu verhindern. Bei der Anwendung in belegten Ställen ist außerdem von toxischen Gasen abzusehen. Als Tracergas sind z. B. Kohlendioxid, Wasserdampf und Wasserstoff verwendet worden [4]. Für Untersuchungen mit diesen Gasen in Ställen sind jedoch recht erhebliche Gasmengen erforderlich. Selbst bei geringen Luftwechseln werden etwa 4 bis 8 l Tracergas pro Kubikmeter Stallluft benötigt, um eine befriedigende Konzentrationsbestimmung durchführen zu können. Wasserstoff besitzt ferner den Nachteil der Explosionsgefahr; Kohlendioxid und Wasserdampf werden von den Tieren selbst in recht erheblichen und wechselnden Mengen abgeschieden, so daß für belegte Ställe diese Gase weniger geeignet sind.

Bei Verwendung von Edelgasen, die chemisch und biologisch inert sind (z. B. Helium), entfallen die oben angeführten Nachteile. Sind sie außerdem noch radioaktiv, dann besteht ein weiterer bedeutender Vorteil im Wegfall der Probenentnahme, da die beim radioaktiven Zerfall ausgesandte Strahlung eine direkte und kontinuierliche Bestimmung der Konzentration ermöglicht [5], [6], [7], [8]. Im Vergleich mit der konventionellen Technik kommt man bei radioaktiven Tracergasen mit einer äußerst geringen Gasmenge aus. Die Radiotoxizität dieser Gase muß freilich gering sein, insbesondere bei belegten Ställen, außerdem dürfen keine gefährlichen Zerfallsprodukte entstehen.

In der *Tabelle 1* sind die für Lüftungstechnische Untersuchungen in Frage kommenden radioaktiven Gase aufgeführt. Die

Tabelle 1. Verfügbare Radionuklide für Lüftungsuntersuchungen.

Nuklid	Zerfallsart, Strahlenenergie (MeV) und Häufigkeit			Halbwertszeit	Dichte g/l	Löslichkeit in 100 ml H ₂ O	Freigrenze µC	MZK*-Werte in Luft µCi/cm ³
	α	β	γ					
Ar-41	—	1,20 (99,2%)	1,29 (99,2%)	1,83 h	1,784 ⁰	5,6 ⁰ cm ³	10	4 · 10 ⁻⁷
Rn-222	5,49 (100%)	—	0,51 (0,08%)	3,82 d	9,73 ⁰	51 ⁰ –22,4 cm ³	0,1	1 · 10 ⁻⁸
Xe-133	—	0,35 (99,3%)	0,08–0,38 (100%)	5,27 d	5,85 ⁰	24 ⁰ –12 ²⁵ cm ³	10	3 · 10 ⁻⁶
Br-82 (CH ₃ Br)	—	0,44 (100%)	0,55–1,48 (100%)	35,4 h	3,974 ²⁵	0,09 ⁰ g	10	6 · 10 ⁻⁸
Kr-85	—	0,67 (99,6%)	6,51 (0,4%)	10,7 a	3,708 ⁰	11,0 ⁰ –6,0 ²⁵ cm ³	100	3 · 10 ⁻⁶

*) Maximal zulässige Konzentration nach der ersten Strahlenschutzverordnung

Halbwertszeit von ^{41}Ar ist mit 1,83 h so kurz, daß es nur in der Nähe eines Kernreaktors zum Einsatz kommen kann.

^{222}Rn besitzt feste radioaktive Folgeprodukte, so daß bei der Inkorporation die Gefahr einer Ablagerung und Anreicherung dieser Produkte besteht. ^{133}Xe ist fast fünfmal so schwer wie Luft und emittiert nur niederenergetische β -Strahlung. ^{82}Br in Form von Methylbromid wurde in die Tabelle ebenfalls aufgenommen, wengleich es sich wegen möglicher Hydrolyse und Adsorption an Einbauten und Wänden für Versuche weniger eignet.

Als günstigste Lösung bietet sich das Radionuklid ^{85}Kr an. Störungen, z. B. durch Wasserlöslichkeit des Kryptons oder seine gegenüber Luft dreimal größere Dichte, traten bisher nicht auf [1], [7], [8]. ^{85}Kr emittiert β -Strahlung mit hinreichender Energie (0,67 MeV) und besitzt einen zu vernachlässigenden Untergrund an γ -Strahlung. Die relativ große Halbwertszeit [10,7 a] wirkt sich äußerst günstig aus, weil keine Korrektur des radioaktiven Zerfalls notwendig ist und das Gas lange lagerfähig ist. Es läßt sich gut in Stahlflaschen aufbewahren und transportieren, ohne daß ein besonderer Strahlenschutz erforderlich ist, weil die β -Strahlung durch die Stahlwand abgeschirmt wird. Die Radiotoxizität ist gering. Gemäß den ICRP- (International Commission for Radiation Protection) Empfehlungen beträgt die maximal zulässige Aktivitätsmenge für eine Inkorporation 10 mCi. Als Vergleich sei hier der Wert für frei in der Atmosphäre befindliches ^{90}Sr von nur 1 μCi angegeben, d. h. ^{90}Sr wird in Bezug auf die Inkorporation 10^4 mal gefährlicher angesehen als ^{85}Kr (9).

Da auch eine langfristige Exposition von Mensch und Tier mit einer Konzentration bis zu $1/10$ der maximal zulässigen Konzentration (MZK-Wert) für ^{85}Kr ($3 \cdot 10^{-7}$ Ci pro m^3) völlig ungefährlich ist, ist die Anwendung dieser Konzentration in der BRD nicht genehmigungspflichtig. Geht man von einer spezifischen ^{85}Kr -Aktivität von 10 mCi/ cm^3 aus, dann ergibt sich aus dieser Konzentration ein Tracergasvolumen von $3 \cdot 10^{-8}$ l $^{85}\text{Kr}/\text{m}^3$ Stallluft und liegt somit um den Faktor 10^{-8} niedriger gegenüber der Messung mit inaktiven Tracern.

Bei der sehr geringen Radiotoxizität des ^{85}Kr und bei der in Ställen gegebenen relativ intensiven Durchlüftung (Luftwechsel häufig bis zehnfach), die stets zu einem raschen Abfall der Ausgangskonzentration des ^{85}Kr und damit zu einer sehr kurzen Verweilzeit führt, kann in belegten Nutztierställen auch die Benutzung einer zehnfachen Konzentration, also bis zu $1/1$ des MZK-Wertes als unbedenklich angesehen werden. Solche Messungen unterliegen jedoch in der BRD in der technischen Vorbereitung und Durchführung einer Genehmigungspflicht und den gesetzlichen Auflagen für Transport und Umgang gemäß den Vorschriften der 1. Strahlenschutzverordnung.

2. Meßmethode

In einem Stall, dessen Luftwechselzahl ermittelt werden soll, wird das radioaktive Gas freigesetzt. Man sorgt für eine homogene Durchmischung von Stallluft und Tracer und registriert die Konzentrationsabnahme als Funktion der Zeit. Dies läßt sich durch folgende Differentialgleichung beschreiben:

$$C = -\frac{V}{Q} \frac{dC}{dt} = -\frac{1}{LW} \frac{dC}{dt}$$

C = Konzentration in Ci/ m^3
 Q = Luftdurchsatz in m^3/h
 V = Stallvolumen in m^3
 $LW = Q/V$ = Luftwechsel in h^{-1}

Die obige Gleichung setzt dabei voraus:

$$\frac{dQ}{dt} = 0$$

die zeitliche Durchflußmenge ist während der Versuchszeit konstant;

$$\frac{dC}{dV} = 0$$

es gibt keine Konzentrationsgradienten im Stall;

nach Integration der Differentialgleichung folgt

$$C = C_0 \cdot \exp(-LW \cdot t)$$

C_0 = Konzentration zur Zeit $t=0$ in Ci/ m^3
 t = Zeit in h.

Die Zeit, in der die Konzentration C auf den Wert C_0/e abgefallen ist, stellt die mittlere Verweilzeit der Luftpartikel im Raum dar bzw. gibt die Zeit eines Luftwechsels an. Der reziproke Wert dieser Zeit ist der zu ermittelnde Luftwechsel pro Stunde.

Bei Verwendung von radioaktiven Tracern mit kurzen Halbwertszeiten muß die obige Gleichung korrigiert werden.

$$C = C_0 \cdot e^{-LW \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

Dabei bedeuten:

$\lambda = \ln 2/T$ Zerfallskonstante des Radionuklids
 T = Halbwertszeit des Radionuklids

3. Vorbereitung des Tracers

^{85}Kr wird normalerweise in abgeschmolzenen Quarzglasampullen geliefert. Zur Herstellung und Freisetzung bestimmter Konzentrationen sind Dosiereinrichtungen notwendig, wie sie beispielsweise in [10] für hochaktives ^{41}Ar beschrieben wurden. Für unsere Versuche wurde 1 Ampulle von 1 cm^3 Inhalt mit 10 mCi $^{85}\text{Kr}^1$ benutzt. Um eine feinere Dosierung der freizusetzenden Aktivität zu erreichen, wurde ein ^{85}Kr -Luftgemisch hergestellt. Als Behälter diente eine 8-Liter-Preßluftflasche, die zunächst evakuiert wurde. Zwischen der Stahlflasche und einem öl- und wasserfreien Hochleistungskompressor wurde ein speziell entwickeltes Zwischenstück angeschraubt, mit dem es möglich ist, die im Inneren befindliche Ampulle zu zerstören, ohne daß aktives Gas austreten oder Glassplitter in die Stahlflasche geraten können. Nach dem Freisetzen des radioaktiven Gases im Zwischenstück wurde das Ventil der evakuierten Stahlflasche geöffnet, der Kompressor eingeschaltet und somit das ^{85}Kr in die Stahlflasche gespült. Es wurde ein ^{85}Kr -Luftgemisch von 200 atü hergestellt; somit stand eine Konzentration von 6,25 μCi $^{85}\text{Kr}/\text{l}$ zur Verfügung. Über ein Reduzierventil und einen angeschlossenen Balgengaszähler ließ sich dann die jeweils benötigte Menge der Stahlflasche entnehmen.

4. Vorversuche

Zunächst wurden labormäßige Voruntersuchungen durchgeführt, um die gesamte Geräteausstattung und die Auswertetechnik zu testen. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Die Gehäusewand des Kunststoffbehälters von 50 l Inhalt wurde mit einem rechteckigen Ausschnitt versehen und mit entsprechenden Dichtungen daran der Detektor, ein Durchflußproportionalzählrohr angebracht. Die Verwendung von Geiger-Müller-Zählrohren [6], [7], [10], Szintillationszählern [12] und Ionisationskammern [11] ist

¹⁾ Hersteller und Bezugsquelle z. B. Messer-Griesheim, Hoechst. Der Preis für 10 mCi ^{85}Kr liegt bei ca. 70,- DM.

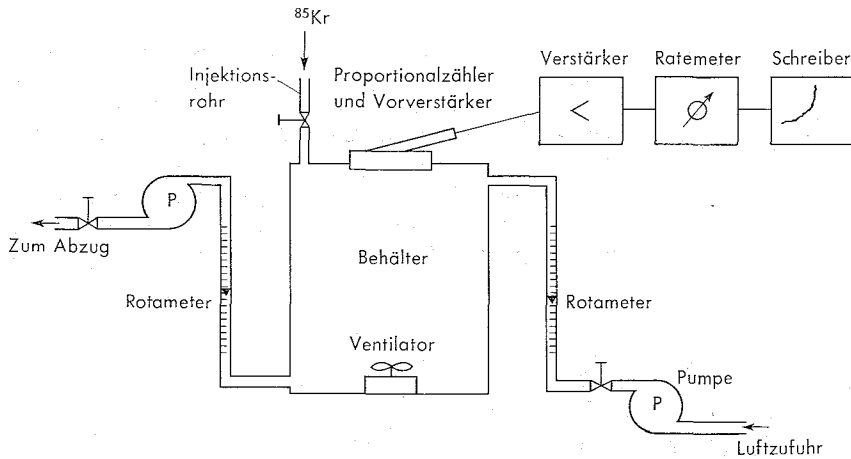


Bild 1. Laborversuchsaufbau zur Luftwechselformung in einem Behälter mit ^{85}Kr .

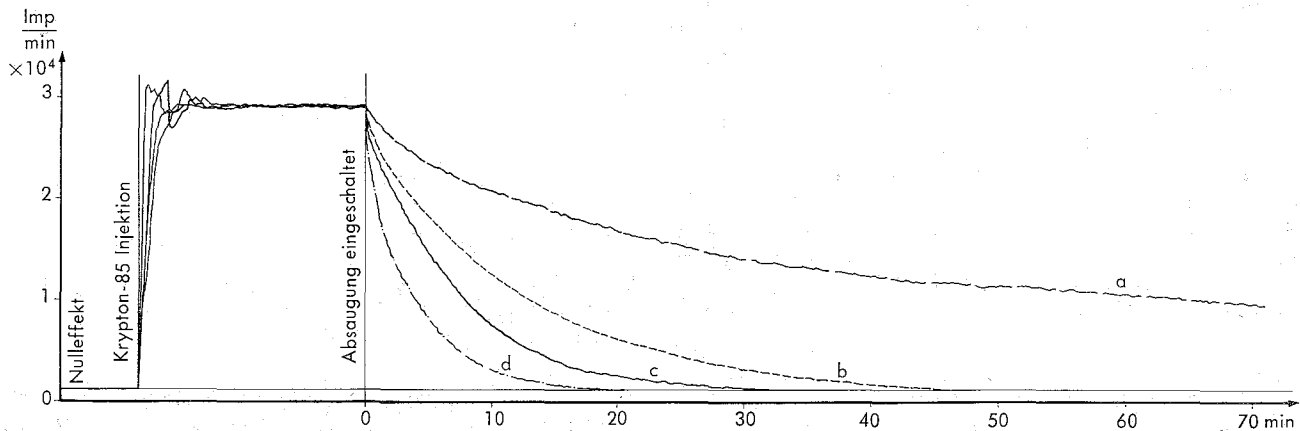


Bild 2. Luftwechselformungen in einem Laborbehälter. Aufzeichnung der ^{85}Kr -Aktivität in Abhängigkeit von der Zeit bei vier verschiedenen Luftwechselformungen.

von früheren Untersuchungen her bekannt. Die hier beschriebene Meßanordnung bestand aus einem Großflächendurchflußproportionalzähler vom Typ FH 407 M²⁾, der mit einem Argon-Methan-(90/10%)-Gemisch als Zählgas betrieben wurde. Das Strahleneintrittsfenster von 96 cm² effektiver Zählfläche bestand aus einer dünnen aluminiumbedampften Kunststoff-Folie (Flächengewicht < 1 mg/cm²), so daß eine hohe Ansprechwahrscheinlichkeit gewährleistet war. Der Vorverstärker ist unmittelbar mit dem Detektor verbunden. Ratemeter und Verstärker bilden eine Kompakt-

einheit Typ FHT 111 A²⁾ und besitzen einen Gleichstrom-Analogausgang, an dem ein Schreiber angeschlossen war. Über das Injektionsrohr gelangte das Tracer gas in den Behälter; der am Boden befindliche Ventilator bewirkte eine schnelle Homogenisierung des ^{85}Kr -Luftgemisches. Auf der rechten Seite des Behälters wurde Frischluft über eine Pumpe zugeführt und auf der gegenüberliegenden Seite mit einer Dosierpumpe abgesaugt. Zu- und Abluftmengen wurden über Rotametermessungen ermittelt.

In Bild 2 sind einige Schreiberkurven von niedrigem bis zu hohem Luftwechsel dargestellt. Nach dem Aufzeichnen des Nulleffektes (natürliche Umgebungs- und Höhenstrahlung) erfolgte die Injektion des ^{85}Kr . Nach kurzer Zeit zeigen die Kurven einen zeitlich konstanten Wert, so daß an dieser Stelle der Homogenisierungsprozeß abgeschlossen ist. Nach dem Einschalten der Absaugung fällt die Kurve entsprechend der Konzentrationsabnahme des aktiven Gemisches ab. Die eingestellte ^{85}Kr -Konzentration betrug in diesen Fällen $\sim 9 \cdot 10^{-6}$ Ci/m³ entsprechend dreifachem MZK-Wert. Bei idealen Bedingungen erhält man als Abklingkurve eine Exponentialfunktion, die sich in halblogarithmischem Maßstab als Gerade darstellt. Bild 3 zeigt die den Schreiberkurven des Bildes 2 entsprechenden Geraden. Die daraus ermittelten Luftwechselformungen sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Die ^{85}Kr -Meßergebnisse sind ferner den aus den Rotametermessungen stammenden Werten gegenübergestellt. Zwischen ^{85}Kr -Messungen und Rotametermessungen zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

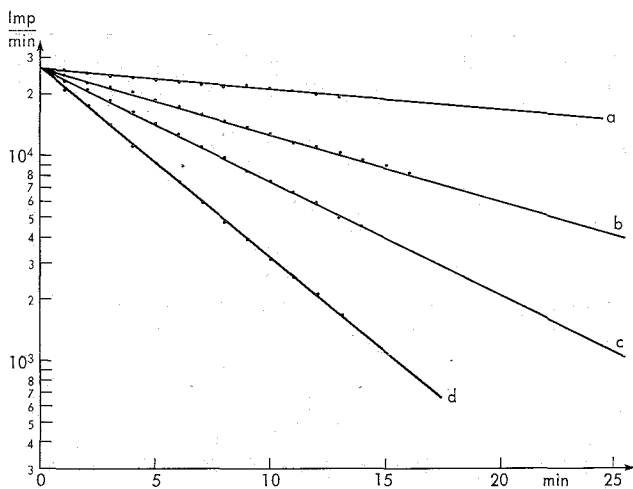


Bild 3. Luftwechselformungen in einem Laborbehälter. Logarithmische Darstellung von Bild 2.

²⁾ Frieseke + Hoepfner, Erlangen

Tabelle 2. Luftwechselbestimmungen in einem 50-l-Behälter: Vergleich ^{85}Kr -Messung mit Rotametermessung.

Versuch	Luftwechsel h^{-1}	
	^{85}Kr -Messung	Rotametermessung
a)	1,2	1,3
b)	4,6	4,8
c)	7,7	8,4
d)	12,7	12,8

5. Versuchsdurchführung in Viehställen

Bei Versuchsbeginn wurde aus der Gasflasche über einen Gaszähler so viel des ^{85}Kr -Luftgemisches im Stall freigesetzt, daß $1/10$ der MZK für ^{85}Kr eingestellt werden konnte. Zwei Personen trugen während des Ausblasens die Gasflasche und den Gaszähler durch den Stall, wobei die Ausströmgeschwindigkeit so bemessen wurde, daß bei einer Freisetzungzeit zwischen 1,5 bis 2 Minuten eine möglichst gute Verteilung im gesamten Stall erreicht wurde. Außerdem unterstützten oszillierende Tischventilatoren die Durchmischung. Zur Registrierung der Aktivität des freigesetzten Tracers wurden Detektoren und Meßgeräte benutzt, wie sie bei den Vorversuchen beschrieben wurden. Die maximale Reichweite von Betaeilchen in Luft beträgt bis zu einigen Metern; das bedeutet, daß auch der Einzugsbereich des Detektors in der gleichen Größenordnung liegt. Es ist daher sinnvoll, mehrere Meßplätze einzurichten, um Aufschluß über lüftungstote Räume und Verteilung der Luftströmung zu bekommen und ggf. Aussagen über die Gestaltung von Stallungen im lüftungstechnischen Sinne machen zu können. Bei niedrigen Luftwechselzahlen sind Freisetzung- und Mischungszeit klein, verglichen mit der Austauschzeit (Zeit für einen Luftwechsel). Nahezu die gesamte Abklingkurve kann zur Auswertung herangezogen werden. Bei hohen Luftwechselzahlen liegen Freisetzung- und Austauschzeit in der gleichen Größenordnung, so daß sich Ausbreitungs- und Austauschvorgänge überlagern, die Aktivität rasch abnimmt, und nur noch der letzte Teil der Abklingkurve zur Auswertung verwendet werden kann.

Die in Bild 4 dargestellten Kurven zeigen einen niedrigen Luftwechsel (Kurve a, erhalten in einem Sauen-Anbindestall mit ca. 330 m^3 Volumen) und einen hohen Luftwechsel (Kurve b, erhalten in einem Legehennenstall mit ca. 700 m^3 Volumen). In beiden Fällen wurde bei der Freisetzung des Tracers die Zwangsbelüftung nicht ausgeschaltet. Die Injektion wurde so bemessen, daß die Konzentration $1/10$ des MZK-Wertes für ^{85}Kr bei ausgeschalteter Lüftung erreicht hätte.

Die Kurven geben Hinweise auf die einzelnen Phasen der Freisetzung- und Mischungszeiten sowie die Abfallzeiten.

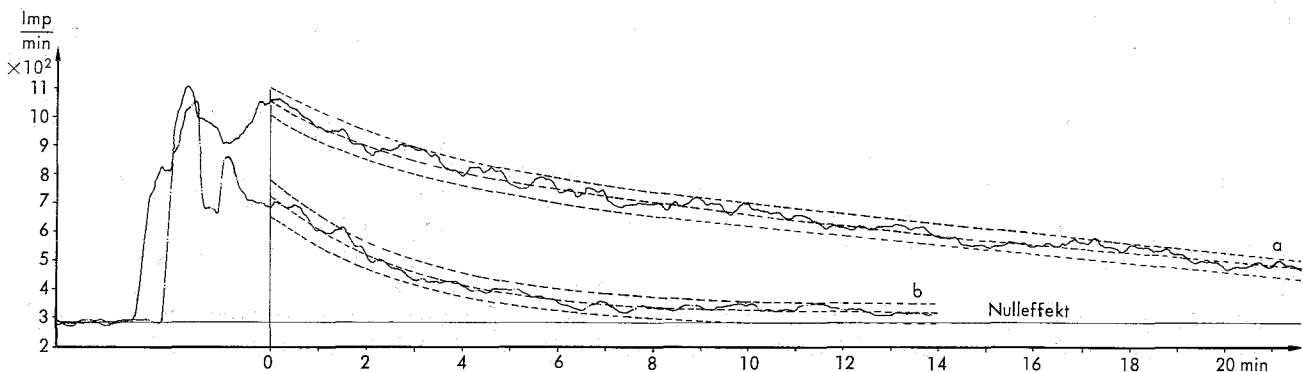


Bild 4. Luftwechselformen in einem Sauen-Anbindestall (Kurve a) und in einem Legehennenstall (Kurve b). Aufzeichnung der ^{85}Kr -Aktivität in Abhängigkeit von der Zeit.

Die die Kurven eingrenzenden gestrichelten Linien sind hierbei nicht nur als maximale Abweichungen des statistischen Fehlers zu werten, sondern zeigen auch die durch Einbauten sowie durch die Bewegung der Tiere hervorgerufenen, im Detektorbereich lokalen unterschiedlichen Lüftungsverhältnisse auf.

Zur Auswertung der Versuche wurden die Exponentialabfallkurven in halblogarithmischem Maßstab aufgezeichnet. Die in Bild 5 dargestellten Geraden entsprechen den Kurven des

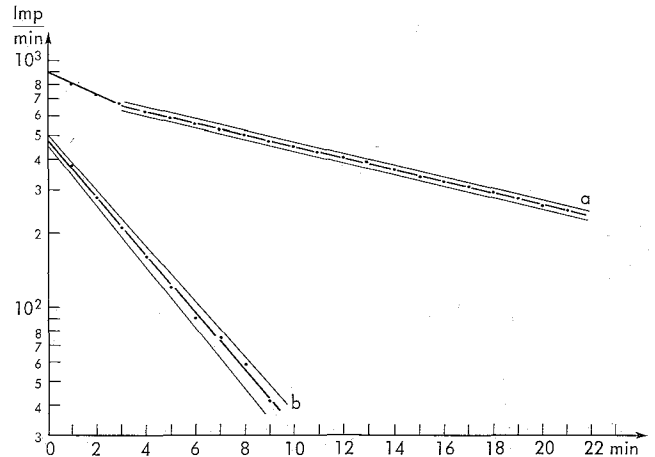


Bild 5. Luftwechselformen in einem Sauen-Anbindestall (Kurve a) und in einem Legehennenstall (Kurve b).

Logarithmische Darstellung von Bild 4.

Bildes 4. Die halblogarithmische Darstellung hat neben der leichteren Auswertung noch den Vorteil, daß der Zeitpunkt der homogenen Verteilung des aktiven Gases besser festgelegt werden kann. Die Kurve a in Bild 5 setzt sich zusammen aus zwei Geraden, wobei der vordere Teil zeigt, daß zu diesem Zeitpunkt die Mischzeit noch nicht abgeschlossen war. Der Punkt, an dem ein homogenes Gemisch vorlag, wurde als Ausgangskonzentration genommen.

Die Fehler der Messungen sind hauptsächlich auf die statistischen Ratemeterabweichungen zurückzuführen. Für die Messungen läßt sich die Standardabweichung σ durch folgende Formel angeben

$$\sigma = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \cdot RC \cdot n}}$$

RC = Zeitkonstante des Ratemeters
 n = Impulsrate

Legt man eine dreifache Standardabweichung zugrunde, so ergibt sich eine statistische Sicherheit von 99,5%. Die die

Meßgerade einhüllenden Linien in *Bild 5* geben die 3σ -Grenze an. Durch Auswertung der in den *Bildern 4 und 5* dargestellten Messungen ergeben sich unter Verwendung der oben angegebenen Formel für die Luftwechselzahlen folgende Werte:

Kurve a) Sauenanbindestall $LW = 3,3 \pm 0,3$

Kurve b) Legehennenstall $LW = 16,2 \pm 2,4$

Bedingt durch die Statistik werden die Fehler mit zunehmenden Luftwechselzahlen größer. Sie liegen unter realen Versuchsbedingungen zwischen 10 und 20%.

Die Abweichungen an drei über den Stall verteilten Meßplätze betragen bis zu 10% und sind in erster Linie als Ausdruck der Ungleichmäßigkeit der im Detektorbereich lokalen Lüftungsintensität zu werten. Die Meßplätze an den Luft-einlaßöffnungen registrierten in der Regel höhere Luftwechselraten als die Meßplätze, die am weitesten von den Luft-einlaß- und Absaugungsöffnungen entfernt lagen.

6. Zusammenfassung

Die vorgelegten Untersuchungen bestätigen, daß Luftwechseluntersuchungen mit Hilfe von radioaktivem ^{85}Kr sogar bei Verwendung von nur $1/10$ der maximal zulässigen Konzentration noch befriedigend durchgeführt werden können³⁾. Eine Anwendung ist jederzeit auch in Viehställen möglich. Das Tracergas ^{85}Kr hat den Vorteil, daß die Ställe bei der Untersuchung mit Tieren belegt und unter Feldbedingungen geprüft werden können, wobei die Lüftungseinrichtungen nicht beeinflußt werden. Das Verfahren ist für ambulante Messungen besonders vorteilhaft, da der Aufbau einer vorhandenen Meßeinrichtung rasch und mit geringem Platzbedarf erfolgen kann. Durch eine beliebig große Anzahl von Meßstellen, die in Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten unabhängig voneinander aufgestellt werden können, besteht die Möglichkeit, sehr unterschiedlichen Stallgegebenheiten befriedigend Rechnung zu tragen. Optimale Ergebnisse, insbesondere bei großen Luftwechseln, sind zu erwar-

³⁾ Auf Wunsch führt das *Laboratorium für Isotopentechnik der Gesellschaft für Kernforschung mbH Karlsruhe* derartige Versuche im Auftrag durch.

ten, wenn nach der ^{85}Kr -Freisetzung durch geeignete Hilfsmittel und Einrichtungen eine möglichst schnelle und homogene Verteilung über den gesamten Stall erreicht wird. Die Genauigkeit des Verfahrens läßt sich weiter steigern, wenn die Konzentration bei der Tracergas-Freisetzung bis auf $1/1$ des MZK-Wertes gesteigert wird.

Literatur

- [1] Hilliger, H. G., und Götting, K.: Zur Prüfung des Luftwechsels in Ställen mittels der Tracergasmethode. Wien. Tierärztl. Mschr. 58 (1971), S. 9.
- [2] Pettenkofer, M. v.: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München 1858.
- [3] Bradtke, F., und Liese, W.: Hilfsbuch für raum- und außenklimatische Messungen, 2. Aufl. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1952.
- [4] Hilliger, H. G.: Die Beurteilung von Lüftung und Wärmeschutz auf Grund von Stallluftmerkmalen in einem massiven Milchvieh-Anbindestall unter winterlichen Verhältnissen. Schriftenr. Arbeitsgem. Landwirtschaft. Bauwesen e. V. (ALB). Frankfurt/Main 1968, H. 31.
- [5] Collins, B. G., und Smith, D. B.: The measurement of ventilation rates using a radioactive tracer J. Inst. Heat Vent. Engineer. 23 (1955), S. 270.
- [6] Willax, H. A., und Maier-Leibnitz, H.: Lüftungsmessungen mit radioaktiven Isotopen. Ges.-Ing. 76 (1955), S. 97.
- [7] Smith, C. V.: Animal housing and meteorology. 2. The rating of ventilation systems for animal houses. Agric. Meteorol. 1 (1964), S. 107.
- [8] Evans, G. V., und Webb, J. W.: An examination of radioisotope techniques for the measurement of ventilation-rate. Rep. Atomic Energy Res. Estab. (AERE) R-6709. Harwell, Berkshire 1971.
- [9] Hart, H.: Radioaktive Isotope in der Betriebsmeßtechnik. Berlin 1962.
- [10] Süß, A., Baumgärtner, F., und Mannl, A.: Untersuchung der Luftverteilung in einer Heubelüftungsanlage mittels radioaktiver Isotope. Atompraxis, 6 (1960), S. 138.
- [11] Hodgkinson, J. R.: A Radioactive Tracer Technique for the Study of Turbulent Diffusion and Mixing in Coal-Mine Ventilation. Int. J. Appl. Radiat. Isotop., 2 (1957), S. 97.
- [12] Cadiergues, R., und Leveque, P.: La mesure de ventilation par traceurs radioactifs. Chaleur Ind. 28 (1952), S. 21.

Anschr. d. Verff.: 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640 bzw. 1 Berlin 33, Königin-Luise-Straße 49.

