

Tracer-gasmeßtechniken zur Ermittlung des Luftwechsels

Anton Maas

1. Einleitung

Die Quantifizierung des Luftaustausches in Gebäuden wird künftig sicherlich einen großen Stellenwert für bau-physikalische Betrachtungen einnehmen. Hinsichtlich des Aspektes der Luftqualität sind Aussagen über Strömungsmuster in Räumen zu treffen, um daraus Kenntnisse über die thermische Behaglichkeit, Frischluftversorgung oder Schadstoffausbreitung abzuleiten (z.B. in [1]). Die Bedeutung des Luftaustausches im Hinblick auf energetische Belange ist offensichtlich, wenn man sieht, daß der Lüftungswärmebedarf bei dem in Deutschland angestrebten Niedrigenergiehaus-Standard die Größenordnungen des Transmissionswärmebedarfs erreicht bzw. übersteigt.

Eine indirekte Messung des Luftwechsels erlauben die sogenannten Tracer-gas-Meßverfahren. Dabei wird eine geringe Menge eines Spurengases (engl.: Tracer-gas) in ein zu untersuchendes Raum- bzw. Gebäudevolumen eingebracht, und anschließend kann aus dem zeitlichen Gaskonzentrationsverlauf, der durch den Luftaustausch sowohl infolge natürlicher als auch mechanischer Lüftung beeinflußt wird, der Luftwechsel berechnet werden.

In dem vorliegenden Beitrag werden die Grundlagen für die Modellbildung zur Bestimmung des globalen Luftaustausches innerhalb eines Raumes oder Gebäudes vorgestellt und es werden die prinzipiellen Meß- und Auswerteverfahren erläutert. Eine im Rahmen von meßtechnischen Untersuchungen zum Luftaustausch bei Fensterlüftung [2] aufgebaute Luftwechselmeßeinrichtung wird beschrieben und hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten der Anlage und der Meßverfahren systematisch untersucht. Die abschließende Fehlerbetrachtung ermöglicht die Abschätzung der auftretenden Gesamtfehler bei der Bestimmung des Luftaustausches mit Hilfe der Tracer-gas-Meßtechnik.

2. Meßprinzip und mathematisch-physikalische Modellbildung

Die meßtechnische Ermittlung des Zu- und Abluftvolumenstroms bzw. des Luftwechsels erfolgt durch ein indirektes Meßverfahren. Dies geschieht dadurch, daß in die betrachtete Meßzone ein geeignetes Tracer-gas (Spuren-gas) eingebracht wird. Der Verlauf der Tracer-gaskonzen-

tration innerhalb der Meßzone wird aufgezeichnet und anschließend läßt sich aus dem ermittelten zeitlichen Konzentrationsverlauf mit Hilfe eines mathematischen Auswerteverfahrens der Zuluftvolumenstrom \dot{V}_{zu} bzw. der Luftwechsel n berechnen.

Für die Auswertung der Konzentrationsmeßwerte muß ein mathematischer Ansatz vorliegen, der die physikalischen Verhältnisse möglichst genau beschreiben sollte. Im folgenden wird in Anlehnung an [3] ein allgemeines mathematisch-physikalisches Modell für eine einzelne Meßzone und Messungen mit einem Tracer-gas aufgestellt. Eine Aufgliederung in die unterschiedlichen wechselseitigen Luftaustauschraten mit den verschiedenen, die Meßzone umgebenden Gebäudeteilen wird dabei nicht vorgenommen, d.h. es kann nach diesem Ansatz nur ein Gesamtluftwechsel für die Meßzone bestimmt werden.

Bild 1 gibt eine Übersicht über die in eine Meßzone ein- und austretenden Tracer-gas-Massenströme.

Eine Bilanzierung der Tracer-gas-Massenströme liefert die Kontinuitätsgleichung

$$V\rho_i \frac{dC_m(t)}{dt} = F\rho_F + \dot{V}_{zu}\rho_{zu}C_{am} - \dot{V}_{ab}\rho_{ab}C_m(t) \quad (1)$$

Dabei ist

$C_m(t)$ die Tracer-gaskonzentration zur Zeit t
(Tracer-gasmasse/Luftmasse)

C_{am} die Tracer-gaskonzentration der Außenluft
(Masse/Masse)

\dot{V}_{zu} die zu einem Zuluftvolumenstrom zusammengefaßten Einzelzuströme in der Meßzone

ρ_{zu} die Dichte der Zuluftströme vor dem Eintritt in die Meßzone

\dot{V}_{ab} die zu einem Abluftvolumenstrom zusammengefaßten einzelnen Abluftströme

ρ_{ab} die Dichte der aus der Meßzone abströmenden Luft

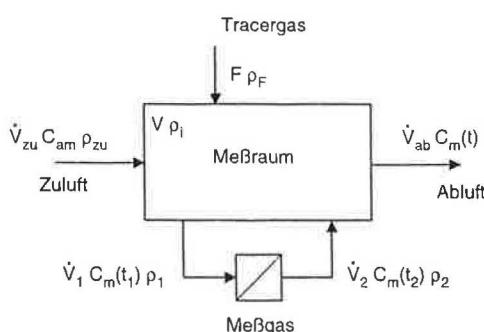
F der Tracer-gaszustrom

ρ_F die Dichte des Tracer-gases vor dem Eintritt in die Meßzone

V das effektive Raumvolumen der Meßzone

ρ_i die Dichte der Luft innerhalb der Meßzone.

Da der bei der Konzentrationsmessung kontinuierlich aus der Meßzone entnommene und an sie zurückgeföhrte Massenstrom $\dot{V}C_m(t)\rho$ gegenüber den anderen auftreten-

**Bild 1.** Modell für eine Meßzone und ein Tracer-gas.

den Massenströmen sehr klein ist, kann die Zeitdifferenz $\Delta t = t_2 - t_1$ zwischen den Zeitpunkten der Entnahme (t_1) und der Rückführung (t_2) der Luftprobe und die nur geringfügige Differenz zwischen ρ_1 und ρ_2 vernachlässigt werden. In jedem Fall sind der entnommene und der rückgeführte Massenstrom gleich, sie können somit aus der Massenbilanz herausgenommen werden.

Es wird davon ausgegangen, daß die Dichte der Luft im Innenraum, die Dichte sämtlicher ein- und austretender Massenströme, der Tracer-gaszustrom sowie die Zuluft- und Abluftvolumenströme während der Zeitdauer eines Meßintervalls konstant sind. Das gleiche gilt für die Umgebungskonzentration C_{am} und das Volumen der Zone.

Weiterhin soll gelten, daß die Dichte ρ_{zu} der an verschiedenen Stellen der Meßzone eintretenden Luftströme gleich ist und diese jeweils die gleiche Tracer-gas-Umgebungskonzentration C_{am} mit sich führen, so daß sie zu einem Zuluftmassenstrom zusammengefaßt werden können. Analog dazu wird vorausgesetzt, daß die Tracer-gaskonzentration $C_m(t)$ und die Dichte ρ_{ab} in allen aus der Meßzone austretenden Luftströmen zu jeder Zeit t gleich sind. Dies bedeutet, daß sie zu einem Abluftmassenstrom zusammengefaßt werden können.

Um von der Annahme ausgehen zu können, die Tracer-gaskonzentration $C_m(t)$ sei während einer Messung zu jeder Zeit in allen Abluftströmen gleich, muß zu jeder Zeit t eine homogene Verteilung des Tracer-gases innerhalb der Meßzone vorliegen.

Für die Massenerhaltung gilt

$$\sum \dot{m}_{ab} = \sum \dot{m}_{zu} \quad (2)$$

und somit für das in *Bild 1* dargestellte System

$$\dot{V}_{ab} \rho_{ab} = \dot{V}_{zu} \rho_{zu} + F \rho_F \quad (3)$$

Das Einsetzen von Gl. (3) in Gl. (1) liefert

$$V \frac{dC_m(t)}{dt} = F \frac{\rho_F}{\rho_i} + \dot{V}_{zu} \frac{\rho_{zu}}{\rho_i} C_{am} - \left(\dot{V}_{zu} \frac{\rho_{zu}}{\rho_i} + F \frac{\rho_F}{\rho_i} \right) C_m(t) \quad (4)$$

Da der Term

$$F \frac{\rho_F}{\rho_i} C_m(t)$$

aufgrund seines sehr geringen Betrages vernachlässigt werden kann, folgt mit der Vereinfachung

$$\frac{\rho_{zu}}{\rho_i} = \frac{\rho_{zu} R_i T_i}{\rho_i R_{zu} T_{zu}} \approx \frac{T_i}{T_{zu}} \quad (5)$$

$$V \frac{dC_m(t)}{dt} = F \frac{\rho_F}{\rho_i} + \dot{V}_{zu} \frac{T_i}{T_{zu}} (C_{am} - C_m(t)) \quad (6)$$

Die Umformung der massebezogenen Konzentrationen auf Volumenbezug ergibt

$$V \frac{dC_m(t)}{dt} = F + \dot{V}_{zu} \frac{T_i}{T_{zu}} (C_a - C(t)) \quad (7)$$

oder mit der Abkürzung

$$\Delta C(t) = C(t) - C_a$$

und umgestellt

$$\dot{V}_{zu} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left(F - V \frac{dC(t)}{dt} \right) \frac{1}{\Delta C(t)} \quad (8)$$

3. Tracer-gasmethoden

3.1 Voraussetzungen bei der Durchführung von Tracer-gas-Messungen

Der Erfolg von Luftwechselmessungen mit Hilfe von Tracer-gasen hängt von der Erfüllung der folgenden Voraussetzungen ab:

a) Bei der Durchführung jeder Luftwechselmessung ist eine vollständige Durchmischung innerhalb des gesamten Volumens des untersuchten Raumes, Gebäudeteils bzw. Gebäudes während der gesamten Meßdauer sicherzustellen.

Vollständige Durchmischung bedeutet, daß die Tracer-gaskonzentration zu jeder Zeit und an jedem Punkt innerhalb der Meßzone gleich ist (Homogenität der Tracer-gaskonzentration), d.h. das eingebrachte Tracer-gas wird nach Eintritt in den Versuchsraum sofort und vollständig mit der Luft vermischt. Die in die Meßzone eintretenden Luftströme sollen nicht die Homogenität beeinträchtigen, auch hier wird also von einer sofortigen und vollständigen Durchmischung ausgegangen.

b) Veränderungen der Tracer-gaskonzentration in der Meßzone sollen allein durch Zufuhr von Tracer-gas oder durch Abtransport mit der Raumluft zustande kommen, d.h. es dürfen keine chemische Zersetzung des Tracer-gases oder Reaktionen mit anderen Stoffen stattfinden. Ab- und Desorption des Tracer-gases an Raumeinrichtungen und Raumumschließungsflächen muß ausgeschlossen sein.

c) Existieren innerhalb der Meßzone eingeschlossene Luftvolumina – z.B. in Möbeln – oder ist die Meßzone durch Türen in einzelne Räume unterteilt, so sind diese vor Beginn der Messung zu öffnen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, eingeschlossene Luftvolumina

gasdicht zu verschließen und sie vom aufgemessenen effektiven Luftvolumen der Meßzone zu subtrahieren. Diese Maßnahmen sind notwendig, um eine zu jeder Zeit gleichmäßige Verteilung des Tracergases im gesamten, als Meßzone definierten Luftvolumen zu erreichen. Werden die genannten Maßnahmen nicht ergriffen, können durch verzögertes Eindringen des Tracergases in die eingeschlossenen Luftvolumina Verfälschungen der Meßergebnisse auftreten.

- d) Der atmosphärische Druck soll während der Meßdauer weitgehend konstant bleiben. Diese Forderung ist meist leicht zu erfüllen, da der atmosphärische Druck innerhalb kurzer Zeitperioden normalerweise nur um $\pm 0,01\%$ und während eines Tages um $\pm 1\%$ schwankt [3]. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit von Meßergebnissen sollte der atmosphärische Druck vor einer Messung notiert und bei Langzeitmessungen während der gesamten Meßdauer aufgezeichnet werden.
- e) Die Einbringung von Tracergas in die Meßzone soll die Dichte der Raumluft nicht signifikant verändern. Da die Konzentration des eingebrachten Tracergases meist unter 10^{-4} Volumenanteilen liegt, ist diese Forderung im allgemeinen erfüllt.

Um eine vollständige Durchmischung (Homogenität) des Luft-Tracergas-Gemisches zu erreichen, wird i. d. R. ein Ventilator eingesetzt. In größeren Räumen und bei der Ermittlung des Luftwechsels eines gesamten Gebäudes oder eines größeren Gebäudeabschnittes kommen meist mehrere über die gesamte Meßzone verteilte Ventilatoren zum Einsatz. Das Schaffen von künstlichen Strömungsbedingungen durch die Ventilatoren kann evtl. die Infiltration beeinflussen und so die Luftwechselmessung verfälschen.

Ist ein mechanisches Lüftungssystem vorhanden, kann das Tracergas auch in den Zuluftkanal eingeblasen werden. Bei Messungen des Luftwechsels für ein komplettes Gebäude wird es oft notwendig sein, das Meßobjekt in mehrere einzeln zu betrachtende Zonen zu unterteilen, da es nur schwer zu erreichen ist, die genannten Bedingungen zu jeder Zeit für das gesamte Gebäude zu erfüllen. Zudem bleiben bei einem Verzicht auf eine geeignete Unterteilung in Zonen die zahlreichen zwischen den einzelnen Räumen oder Gebäudeteilen stattfindenden Luftaustauschraten unberücksichtigt, und es wird so ein unrealistischer Außenluftwechsel für das Gesamtgebäude ermittelt. Zur Ermittlung der Luftaustauschraten zwischen einzelnen Zonen sind Messungen mit mehreren Tracergasen prädestiniert (Multi-Tracer-Technik).

Hinweise zur Problematik der Mischung in Wohnhäusern, in mehrfach unterteilten Gebäuden und in Hallen werden in [4; 5] gegeben. In [3] und [7–9] finden sich Angaben zur Messung des Luftaustausches zwischen zwei oder mehreren Zonen mit einem oder mehreren Spurengasen.

3.2 Konzentrationsabfall-Methode

Bei dieser am häufigsten angewandten Methode, der „Abklingmethode“, wird Tracergas vor Beginn der Messung in den Raum eingeblasen, gründlich verwirbelt und mit der Raumluft vermischt, so daß zu Beginn der Mes-

sung im gesamten Raum eine weitgehend gleichmäßige Tracergasanfangskonzentration vorherrscht. Durch von außen oder aus anderen Gebäudeteilen in den Meßraum eindringende Luft und Abtransport des Luft-Tracergas-Gemisches erfolgt ein Konzentrationsabfall, der in Form von Konzentrations-Zeit-Meßwertepaaren aufgezeichnet wird. Über die mathematische Auswertung dieser Meßwerte läßt sich anschließend ein Durchschnittswert für den Luftwechsel n berechnen.

Veränderungen von Randbedingungen während einer Messung, wie z. B. das Öffnen von Fenstern oder Türen und Witterungswechsel, können den Luftwechsel stark beeinflussen. Dies kann den Verlauf des Tracergas-Konzentrationsabfalls, der sich normalerweise zu einer exponentiell abfallenden Kurve ergibt, beeinflussen.

Die Kenntnis der in den Raum eingeblasenen Tracergasmenge ist nicht notwendig. Sie hängt von der verwendeten Gasart, dem Volumen des Raumes und der gewünschten Größe der Anfangskonzentration ab. Die Anfangskonzentration sollte 90 bis 100 % der Meßbereichs-Obergrenze des eingesetzten Gasanalysators betragen.

Für die Berechnung des Außenluft-Volumenstromes muß das Prüfraumvolumen bekannt sein, nicht aber zur Ermittlung des Luftwechsels n .

Da die zu Beginn der Messung im Prüfraum vorhandene Tracergasmenge nach einer begrenzten Zeit abtransportiert ist, eignet sich die Konzentrationsabfall-Methode am ehesten für Messungen von geringen bis mittleren Luftwechseln und für relativ kurze Meßzeiträume.

Um zu Durchschnittswerten über längere Zeiträume zu kommen, kann der Versuch bei anderen Randbedingungen wiederholt werden, oder es wird nach dem Abfallen der Konzentration auf einen Minimalwert sofort wieder neues Spurengas eingeblasen, verwirbelt und der Konzentrationsverlauf gemessen, d. h. die Messungen folgen direkt aufeinander.

3.3 Konstant-Konzentrations-Methode

Wie bei der Konzentrationsabfall-Methode wird vor Beginn der Messung Tracergas in den Prüfraum geleitet und gründlich mit der Luft vermischt, bis die gewünschte Konzentration erreicht ist. Während der Messung wird dieser Sollwert durch eine geeignete Regeleinrichtung konstant gehalten. Gaskonzentration und Tracergaseintrag werden über die Zeit gemessen und aufgezeichnet.

Bei optimalem Regelverhalten, d. h. beim Erreichen einer hohen Konstanz der Tracergaskonzentration, sind der Zuluftvolumenstrom und damit auch der Luftwechsel zu der Tracergas-Einblasrate proportional, was die Auswertung von Meßergebnissen sehr vereinfacht. Zudem stellen Änderungen von Randbedingungen während der Messung kein großes Problem dar, wenn die sich daraus ergebenden Konzentrationsänderungen sehr schnell erfaßt und korrigiert werden. So eignet sich diese Methode hervorragend zur vollautomatischen, langfristigen Aufzeichnung des veränderlichen Luftwechsels. Das Volumen muß nur für die Bestimmung des Luftwechsels n bekannt sein, nicht aber für die Ermittlung eines Zu- oder Außenluftstromes.

Die experimentelle Ausstattung ist jedoch im Vergleich mit den anderen Methoden deutlich aufwendiger und teurer. Unter anderem wird ein sehr genaues Meßgerät zur kontinuierlichen Erfassung des Tracergas-Volumenstromes sowie eine Regelung und ein elektronisch exakt steuerbares Feindosierventil zur kontinuierlichen Einstellung des Tracergasstromes benötigt. Messungen nach anderen Tracergasverfahren (Konzentrationsabfall, Konstant-Zufuhr, Puls-Methode) sind allerdings mit diesem aufwendigen Meßaufbau wiederum leicht zu realisieren.

3.4 Nachteile und Grenzen der Tracergas-Meßverfahren

Der Hauptnachteil der Ermittlung des Luftwechsels über Tracergas-Messungen liegt darin, daß aus Einzelmessungen im Grunde keine allgemeingültigen Aussagen über den Luftwechsel in einem Gebäude oder Gebäudeteil gemacht werden können, da die Meßergebnisse zu stark von sich verändernden und nicht vorausberechenbaren Randbedingungen abhängen, wie u. a. der Windgeschwindigkeit und -richtung, den Innenraum- und Umgebungstemperaturen – und auch den Temperaturen in benachbarten Räumen. Sie sind deshalb nicht jederzeit reproduzierbar.

Der Aufwand für die notwendigen längerfristigen Messungen ist erheblich und die umfangreiche und aufwendige Instrumentierung muß während der gesamten Meßdauer am Meßort (z. B. Wohngebäude) verbleiben. Eine Alternative stellt die Entnahme von Luftproben in Flaschen oder Absorptionsröhren während des Versuchs dar, die nach dessen Abschluß im Labor analysiert werden (Passive Sampling Method) [10; 11].

Ein weiterer Nachteil der Tracergas-Methoden ist, daß das für eine gleichmäßige Verteilung der Konzentration des Tracergases im Prüfraum erforderliche Mischen einen künstlichen Zustand erzeugt, der unter Umständen die Resultate beeinflußt. Bei längerfristigen Messungen wird z. T. unabhängig von der verwendeten Methode eine Verwirbelung durch im Raum aufgestellte Ventilatoren während der gesamten Meßdauer notwendig sein, insbesondere wenn sich die Dichte des verwendeten Tracergases deutlich von der Dichte der Luft unterscheidet. Der Dichteeinfluß ist zu vernachlässigen, wenn die Gaskonzentration ausreichend klein gewählt wird [10].

Zudem ist die Kenntnis des Luftwechsels eines Raumes nur sehr bedingt zur Abschätzung der Raumluftqualität und der durch Schadstoffe bedingten Risiken geeignet, da er keine Auskunft über die Luftverteilung und deshalb z. B. auch nicht über zeitliche und räumliche Schwankungen von Schadstoffbelastungen in einem Raum oder Gebäude gibt. Es lassen sich somit keine Aussagen über die Effizienz des Luftaustausches in unterschiedlichen Bereichen einer untersuchten Meßzone ableiten. In [6] wird deshalb auch die Ermittlung des globalen Luftwechsels als Durchschnittswert für Räume oder gar ganze Gebäude in Frage gestellt.

Zur Beschreibung der Raumluftqualität und der „Güte“ der Raumbelüftung sind Kenngrößen wie der „Luftaus-

tauschwirkungsgrad“ und die „Lüftungseffektivität“ wesentlich aussagekräftiger.

Der Begriff der Lüftungseffektivität bezieht sich u. a. auf die Effizienz des Luftaustausches bzw. der Schadstoffabfuhr in bestimmten Bereichen – z. B. in Aufenthaltszonen – in einem untersuchten Raum. Der Luftaustauschwirkungsgrad stellt ein Maß für den Grad der Durchmischung von Frischluft und Raumluft dar. Es lassen sich durch ihn Aussagen über die Art des Strömungsverhaltens im Raum ableiten. Bei Messungen zur Ermittlung des Luftwechsels wird dagegen durch das künstliche Herbeiführen einer homogenen Durchmischung eine Aussage über die sich natürlich einstellende Luftverteilung und Strömungsbedingungen unmöglich gemacht.

In [6] wird das „Konzept vom Alter der Luft“ erläutert, nach dem durch Anwendung von Spurengasmessungen die genannten Kenngrößen ermittelt werden können. Nachteil ist allerdings, daß Messungen des „Alters der Luft“ immer das Vorhandensein eines Abluftkanals erfordern, durch den die gesamte Raumluft abströmt und in welchem die Abluftkonzentration gemessen werden kann. In einem Raum mit ausschließlich natürlicher Lüftung ist also nur der globale Luftwechsel, nicht aber das durchschnittliche Alter der Raumluft oder der Luftaustauschwirkungsgrad meßbar.

Ein weiteres grundlegendes Problem stellt die in den einschlägigen Vorschriften erhobene Forderung nach einem gesonderten Nachweis des reinen Außenluftwechsels bzw. von reinen Außenluftraten dar. Der Außenluftwechsel bezieht sich ausschließlich auf das mit der Gebäudeumgebung ausgetauschte Luftvolumen. Die Einhaltung dieser Forderung ist wichtig, um aus den Ergebnissen der Messungen wenigstens ein Mindestmaß an Aussagen bezüglich der Raumluftqualität ableiten zu können.

Der i. d. R. auftretende Luftaustausch zwischen Gebäude Teilen sowie das Wiedereintreten von Luft, z. B. in Folge von Kurzschlußströmungen an Gebäudeöffnungen, können bewirken, daß bei Messungen ein vom reinen Außenluftwechsel abweichender Gesamtluftwechsel erfaßt wird. Verwertbare Ergebnisse sind deshalb nur durch eine für den jeweils vorliegenden Fall günstige Wahl der Entnahmestelle der zu untersuchenden Luft, der Anzahl der Entnahmestellen und der dabei zulässigen Randbedingungen im Raum zu erwarten.

Zu den dabei maßgeblichen Randbedingungen gehören die Luftströmungen im Raum. Sie werden hervorgerufen durch natürliche Einwirkungen, wie Temperaturdifferenzen zwischen Innenraum- und Außenluft sowie durch Winddruck, oder sie werden künstlich durch im Prüfraum installierte Ventilatoren oder mechanische Belüftung erzeugt. Im Zweifelsfall muß deshalb parallel zur Luftwechselmessung eine qualitative Einschätzung der Raumluftströmung im Prüfraum vorgenommen werden. Das kann bei Kenntnis bestimmter Außenbedingungen über die Berechnung oder die qualitative Messung der Raumströmung erfolgen. Der Aufwand zur Ermittlung eines Außenluftwechsels kann damit erheblich steigen.

Trotz dieser Probleme stellen Tracergasmessungen aber letztlich die einzige praktisch verfügbare Möglichkeit dar,

den natürlichen Luftwechsel in einem Gebäude zu bestimmen.

Das in [12] beschriebene Meßverfahren, welches auf einer Wärmebilanz beruht, ist aufgrund der komplexen Randbedingungen ausschließlich in speziellen Versuchsräumen anwendbar.

3.5 Auswerteverfahren

Für die Auswertung der in Abschnitt 2 aufgeführten systembeschreibenden Differentialgleichung wird das in [3] dargestellte Integralverfahren verwendet. Hierbei wird die Mittelwertbildung über eine Zeitperiode Δt , die dem Abstand zwischen zwei oder mehreren Messungen entspricht, vorgenommen. Die allgemeine Form der zeitlichen Mittelwertbildung lautet

$$x_m = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} x(t) dt \quad (9)$$

Führt man die Mittelwertbildung gem. obiger Definition für Gl. (8) ein, folgt

$$\int_t^{t+\Delta t} \dot{V}_{zu} dt = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \int_t^{t+\Delta t} \frac{F}{\Delta C(t)} dt - V \int_t^{t+\Delta t} \frac{dC(t)}{\Delta C(t)} \right\} \quad (10)$$

und daraus

$$\begin{aligned} \int_t^{t+\Delta t} \dot{V}_{zu} dt &= \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \int_t^{t+\Delta t} \frac{F}{\Delta C(t)} dt - V[\ln \Delta C(t + \Delta t) - \right. \\ &\quad \left. - \ln \Delta C(t)] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

Nach Division der Gleichung durch Δt ergibt sich der mittlere Zuluftvolumenstrom aus

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \frac{F_m}{\Delta C_m(t)} + \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (12)$$

mit

$$\Delta C_m(t) = \frac{\Delta C(t) + \Delta C(t + \Delta t)}{2}$$

Gl. (12) stellt ein allgemeines Auswerteverfahren zur Ermittlung des mittleren Zuluftvolumenstroms bzw. des mittleren Luftwechsels dar. Vereinfacht man die Berechnungen dahingehend, daß bei der Messung ein Tracer-gas Verwendung findet, das in der Umgebungsluft nicht enthalten ist, d.h. $C_a = 0$, folgt aus Gl. (12)

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \left\{ \frac{F_m}{C_m(t)} + \frac{V}{\Delta t} \ln \frac{C(t)}{C(t + \Delta t)} \right\} \quad (13)$$

Unter Voraussetzung eines idealen Regelsystems und somit der Annahme einer exakt konstanten Konzentration während der Messung kann Gl. (13) nochmals vereinfacht werden

$$\dot{V}_{zu,m} = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{F_m}{C(t)} \quad (14)$$

Bei der Durchführung der Konzentrationsabfall-Methode wird kein Tracer-gas in die Meßzone eingeblasen, also $F = 0$. Mit der Definition

$$n_m = \frac{\dot{V}_{zu,m}}{V} \quad (15)$$

ergibt sich damit aus Gl. (12) der mittlere Luftwechsel zu

$$n_m = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (16)$$

4. Luftwechselmeßsystem

Ausgehend von dem zuvor beschriebenen Tracer-gas-Meßverfahren umfaßt eine Versuchseinrichtung geeignete Komponenten zur Einbringung des Tracer-gases, zur Meßgasentnahme, zur Meßgasanalyse und zur Steuerung und Meßwerterfassung. Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Komponenten und komplettete Meßsysteme wird in [13] gegeben. Weitere Angaben zu Aufbau und Anwendung von Tracer-gas-Meßeinrichtungen werden in [14–19] gemacht. Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Tracer-gases werden u.a. in [3; 10; 13] vorgestellt. Die spezielle Anwendung der Konstant-Konzentrations-Methode im Hinblick auf die erforderliche Regelungstechnik wird u.a. in [20–23] behandelt.

4.1 Beschreibung des Meßaufbaus

Der gesamte Meßaufbau ist innerhalb eines Versuchsbau-gebäudes auf den Dachboden, den eigentlichen Meß- oder Prüfraum und den als Laborraum eingerichteten Keller-raum verteilt.

Im Kellerraum ist der Infrarotabsorptions-Gasanalysator als 19"-Einschub in einem Schwenkgehäuse installiert. Er dient zur kontinuierlichen Messung von Distickstoffoxid-konzentrationen (N_2O) im Bereich zwischen 0 und 100 ppm (erster Meßbereich) und zwischen 0 und 500 ppm (zweiter Meßbereich). Das Meßgas wird durch eine geräteinterne Meßgaspumpe angesaugt.

Jede der vier Meßgas-Ansaugleitung kann an jeweils ein Magnetventil angeschlossen werden, und zwar so, daß in Ruhestellung der Ventile das angesaugte Meßgas über die Vorabsaugpumpe und eine gesonderte Kompensationsleitung in den Prüfraum zurück gepumpt wird. Erhält eines der Ventile einen Schaltimpuls, so wird das Meßgas von der an diesem Ventil angeschlossenen Meßstelle direkt in den Analysator geleitet, während das Gas von den anderen drei Meßstellen in den Prüfraum zurück gepumpt wird. Durch die Vorabsaugpumpe wird so erreicht, daß an den Ventilen ständig Meßgas von allen Meßstellen anliegt. Aufgrund der Länge der Schlauchleitung zwischen Meßstelle und Ventil von jeweils 11 Metern ergibt sich allerdings, daß das Meßgas gegenüber dem Zeitpunkt der Ventil-Umschaltung bereits um das Produkt aus Leitungsvolumen und dem Kehrwert des Meßgas-Volumenstroms älter ist, was aber vernachlässigt werden kann.

Dies gilt nicht für das vom Meßgas durchströmte Volumen „hinter“ den Ventilen, also vor allem innerhalb des Gasanalysators (Leitungen, Filter, Pumpe, Meßküvette). Das Produkt aus diesem Volumen und dem Kehrwert des Meßgas-Volumenstroms ergibt die Zeit, die das nachströmende Meßgas nach der Umschaltung von einer Meßstelle auf eine andere benötigt, um das bisher im Analysator und insbesondere in der Meßküvette befindliche Gas zu verdrängen. Die Ansprechverzögerung des Gasanalysators, die max. 40 s beträgt, wird berücksichtigt, indem zwischen dem Zeitpunkt des Umschaltens auf eine andere Meßstelle und der Durchführung einer Distickstoffoxidkonzentrations-Messung, im Meßwert erfassungsprogramm eine Verzögerungszeit vorgesehen ist.

Für die Messungen mit der Konstant-Konzentrations-Methode sind die vier Meßgasleitungen direkt vor dem Analysator zusammengeführt und auf ein Magnetventil geschaltet. Es wird somit eine mittlere N_2O -Konzentration als Ist-Wert des Regelsystems und zur Bestimmung des Luftwechsels herangezogen.

Im Kellerraum befinden sich auch die Druckgasflaschen mit dem Tracergas Distickstoffoxid sowie zwei weitere Druckgasflaschen mit Prüfgasen für die Nullpunkt- bzw. die Empfindlichkeitskalibrierung, die zur Durchführung von Kalibrierungsprozeduren an einen Meßgaseingang anzuschließen sind. Alle drei Druckgasflaschen sind neben dem obligatorischen Absperrventil mit Flaschendruckminderern ausgestattet, wobei für das Tracergas ein zweistufiger Druckminderer mit besonders hoher Regelgenauigkeit vorgesehen ist. Zusätzlich wird ein Feindosierventil eingesetzt, um eine möglichst hohe Dosierge nauigkeit und Konstanz des Tracer-gasmolenstromes zu erreichen. Ein über das Meßprogramm ansteuerbares Magnetventil öffnet oder schließt die Tracer-gaszufuhr, die über einen Massenstrom-Regler gemessen wird.

Das Distickstoffoxid wird über einen PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 4 mm in den Prüfraum geleitet. Außerdem wird das über die Vorabsaugpumpe dem Prüfraum entzogene sowie das durch den Analysator strömende Gas über zwei PVC-Schlauchleitungen mit einem Innendurchmesser von 6 mm wieder zurückgeführt, um den Meßgasverlust zu kom pensieren. Durch die zeitliche Differenz zwischen den Zeitpunkten des Absaugens des Meßgases aus dem Prüfraum und dem Wiedereintritt entsteht wegen der relativ geringen Volumenströme nur ein vernachlässigbar kleiner Fehler.

Im Prüfraum kann das Distickstoffoxid und das rückgeführte Meßgas mittels eines selbsttätig schwenkenden Tischventilators künstlich mit der Raumluft bzw. dem im Prüfraum befindlichen Meßgas verwirbelt werden. Die Anordnung dieser Tracer-gas-Eintrittsstelle im Prüfraum ist variierbar. Dies gilt auch für die Meßgasansaugstellen, die jeweils an beweglichen Stativen angeordnet sind.

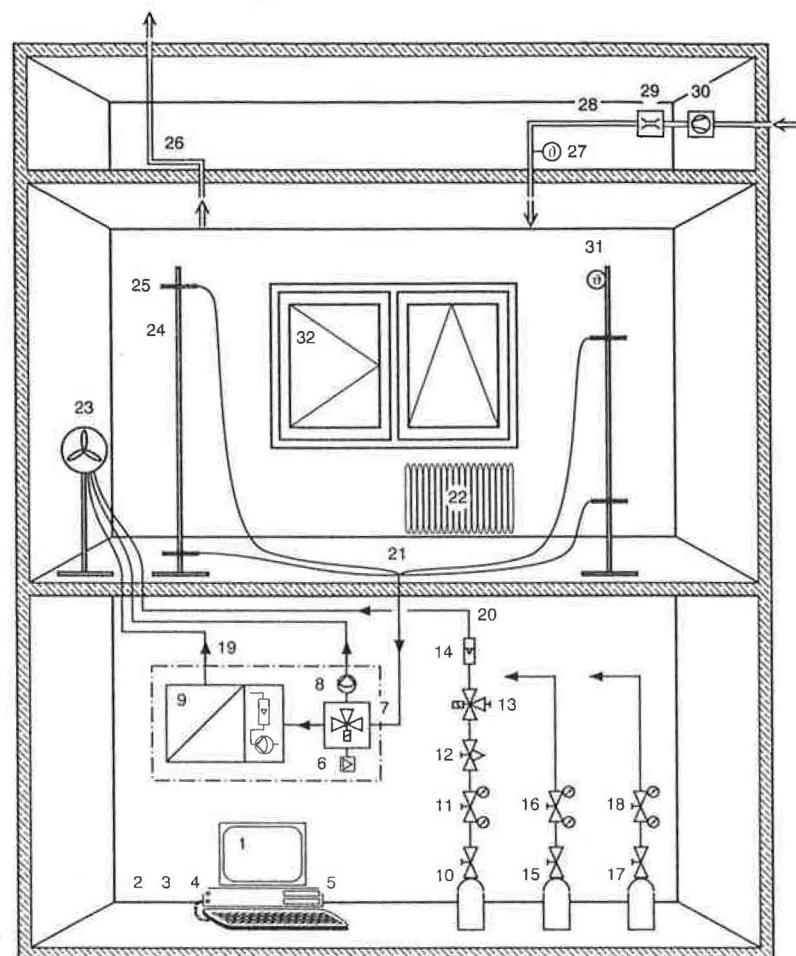


Bild 2. Schematischer Aufbau des Versuchsräums und der Mebeinrichtung.

Eine Meßstelle für die Aufnahme der Innenraumtemperatur befindet sich etwa in Raummitte, wobei der Pt-100-Meßfühler gegenüber Wärmestrahlung durch einen mit Aluminium umhüllten Kunststoffbecher weitgehend abgeschirmt ist.

Über eine im Dachboden installierte Lüftungsanlage, welche im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausschließlich für Referenzmessungen eingesetzt wird, können Zu- bzw. Außenlufraten bis zu 100 m³/h vorgegeben werden. Die Ab- bzw. Fortluft wird über das Dach abgeführt. Ein im Dachboden aufgestellter Radialventilator saugt die Außenluft an und fördert sie über die Zuluftführung von insgesamt etwa 7 Metern Länge in den Prüfraum. Ein in die Zuluftleitung integriertes Flügelradanemometer dient zur Ermittlung des Zuluftvolumenstroms.

Die Meßdatenerfassung, die Steuerung der Fensterstellungen und die Regelung der Konzentration und der mechanischen Lüftungsanlage werden mit dem Programm LabVIEW der Firma National Instruments realisiert. Als PC wird ein AT-386-Rechner mit 8 MByte RAM-Speicher eingesetzt. Der Rechner ist mit einer 16-Bit-Analog-I/O-Karte der Firma National Instruments ausgestattet. Die Karte besitzt 8 analoge Eingänge und zwei analoge Ausgänge. Die Ansteuerung der insgesamt 32 Relais wird zum Teil von der AT-MIO-16X-Karte und zum Teil von

der Digital-I/O-Karte übernommen. Jedes Relais kann mit 6 A bei 30 VDC oder 250 VAC belastet werden, oder mit einer Leistung von 170 W bzw. 1800 VA.

Das Programm zur Erfassung der Meßgrößen und Regelung der Tracer-gaskonzentration für die Konstant-Konzentrations-Methode erzeugt Tagesdateien, in denen Gaskonzentration und -zufuhr sowie Raumlufttemperatur in 20-s-Intervallen gespeichert werden. Die Messung und Regelung der Konzentration erfolgt in 5-s-Abständen. Temperaturen werden als Einzelwerte, Tracer-gaskonzentration und -zufuhr als Mittelwerte in dem Intervall abgelegt.

Detaillierte Angaben zum Meßprogramm, zu den verwendeten Hardwarekomponenten sowie weiteren Programmen zur Kalibration des Meßsystems und Luftwechselmes-sung bei Einsatz der Lüftungsanlage sind in [24] zu finden.

Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau des Versuchsräumes und der Meßeinrichtung. *Tab. 1* enthält Anga-ben der Komponenten.

4.2 Regelungssystem

Die Durchführung von Tracer-gas-Messungen mit der Konstant-Konzen-trations-Methode erfordert den Ein-satz einer Regeleinrichtung, um die in 3.3 beschriebene Vorgehensweise bei dieser Meßmethode zu ermöglichen. Basierend auf den in 4.1 genannten Komponenten des Versuchsaufbaus, wird zunächst ein einfaches Modell des Regelkreises aufgestellt (*Bild 3*).

Die Regelung erfolgt über einen Soft-ware-PID-Regler nach [25]. In [24] ist die programmtechnische Umsetzung der Regelalgorithmen näher erläutert. Die Zeitkonstante des Stel-lers beträgt nach Angaben des Her-stellers $T_2 = 2$ s. Innerhalb dieser Zeit ist der Istwert mit $\pm 2\%$ auf den Soll-wert eingeregelt. Die Zeitkonstante des Analysator ist $T_3 = 40$ s. Diese Zeit benötigt der Analysator um bei einem Konzentrationsprung von 0 auf 100 ppm den Endwert zu errei-chen. Evtl. auftretende Totzeiten durch die Länge der Gasschläuche brauchen nicht berücksichtigt zu wer-den, da der Gasanalysator, wie bereits genannt, eine Vorabsaugepumpe be-

Tabelle 1. Meßaufbau – Liste der Komponenten.

1	IBM-AT-kompatibler PC	17	Druckgasflasche mit Absperrventil; Prüfgas Stickstoff 5.0 zur Nullpunkt-Kalibrierung
2	Analog I/O-Karte im PC, Typ: National Instruments, AT-MIO-16X	18	Flaschendruckminderer; zweistufig, 300/2.5 bar; Typ MESSER GRIESHEIM Constant ZW, N 1-1,5
3	Digital I/O-Karte im PC, Typ: National Instruments, PC-DIO-24	19	Meßgas-Rückführungen aus dem Analysator und von der Vorabsaugpumpe in den Meßraum
4	4 Relaiskarten, Typ: National Instruments, SC 2062	20	Distickstoffoxid-Einleitung in den Meßraum
5	Drehzahlsteller für Zuluftventilator	21	Meßgas-Ansaugleitungen
6	Magnetventil-Verstärker	22	Elektro-Ölradiator, 2 kW
7	Meßstellenumschalter mit Magnetventilen; Anschlußmöglichkeit für vier Meßstellen	23	Tischventilator zur Verwirbelung des Tracer-gases mit der Raumluft; automatisch schwenkend, Schwenkwinkel ca. 85°, ø 250 mm
8	Meßgas-Vorabsaugpumpe	24	Stative zur Positionierung der Konzentrations-Meßstellen im Raum
9	Distickstoffoxid-Gasanalysator mit interner Meßgaspumpe und Durchflußanzeige; Typ: MAIHAK UNOR 6N	25	Meßgas-Ansaugtrichter
10	Druckgasflasche mit Absperrventil; Distickstoff 2.0 (Tracer-gas)	26	Abluftkanal
11	Zweistufiger Flaschendruckminderer mit hoher Regelgenauigkeit; Typ: ALPHAGAZ HBS 300/1, 300/1.5 bar	27	Zulufttemperaturfühler (PT 100)
12	Feindosierventil, Typ: ALPHAGAZ Milli-Mite	28	Zuluftkanal
13	2/2-Wege-Magnetventil zum Absperren der Tracer-gaszufuhr; Typ: Bürkert 124	29	Flügelradanemometer zur Zuluft-Volumenstrommessung; Typ: LAMBRECHT Nr. 1468 (20/4)
14	Massenstromregler für Distickstoffoxid, Typ: Brooks 5850 E, 0-300 ml/min	30	Zuluft-Radialventilator; Typ: AIRFLOW ELG 64
15	Druckgasflasche mit Absperrventil; Prüfgasmisch Stickstoff 5.0 und Distickstoff 2.0 (90.4 ± 2 ppm) zur Empfindlichkeits-Kalibrierung	31	Innenraumtemperatur-Meßstelle (PT 100)
16	Flaschendruckminderer; zweistufig, 300/2.5 bar; Typ: MESSER GRIESHEIM Constant ZW, H 1-1,5	32	Dreh- und Kippflügel-Fenster; Breite: 1,98 m, Höhe: 1.33 m

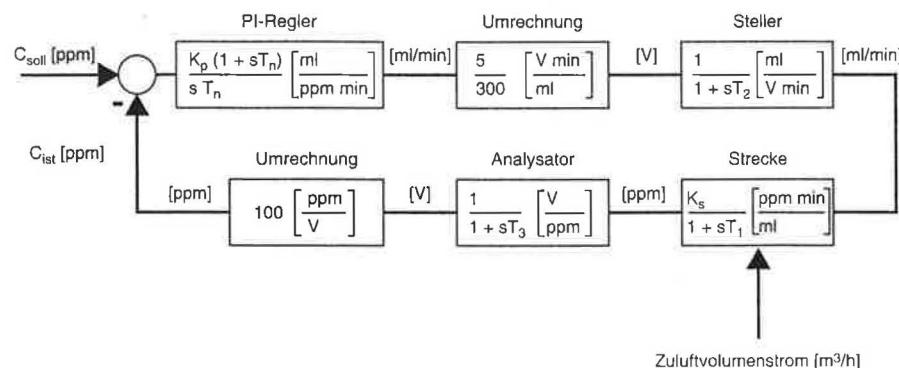


Bild 3. Modell des Tracer-gas-Konzentrations-Regelkreises.

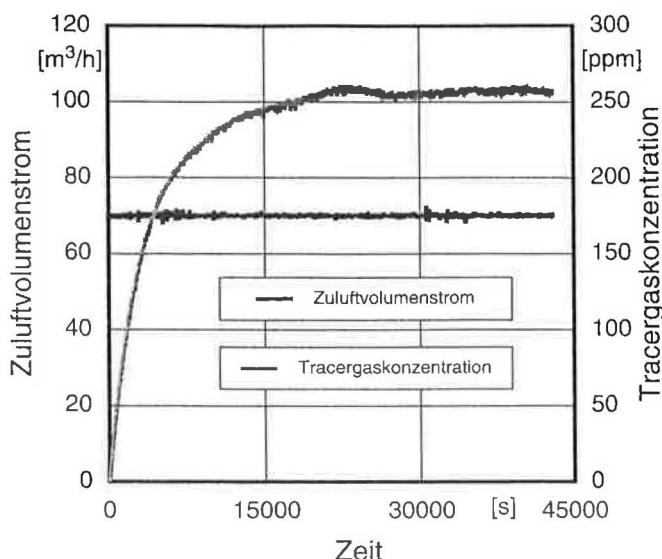


Bild 4. Sprungantwort des Konzentrations-Regelkreises bei einem Zuluftvolumenstrom von $70 \text{ m}^3/\text{h}$.

sitzt, so daß das Meßgas immer direkt am Analysator anliegt und über die Magnetventile auf das Spektrometer geschaltet werden kann.

Über die eigentliche Regelstrecke liegen keine zeitlichen Angaben vor. Unter der Strecke ist das Einblasen des Tracer-gases in den Raum, die Verteilung und gleichmäßige Vermischung mit der Raumluft durch einen Zimmerventilator, die Rückführung des Tracer-gases zum Analysator und der Raum an sich zu verstehen. Um die Strecke geeignet modellieren zu können und um die Zeitkonstanten zu bestimmen, werden bei definierten Störgrößen verschiedene Sprungantworten aufgenommen. Auf den Steller wird ein Sprung von 0 auf 5 V gegeben, der somit die Strecke mit einem Sprung von 0 auf 300 ml/min Tracer-gaseintrag beaufschlägt. Es ergeben sich zeitliche Verläufe des Zuluftvolumenstroms und der Tracer-gaskonzentration wie in *Bild 4* exemplarisch dargestellt.

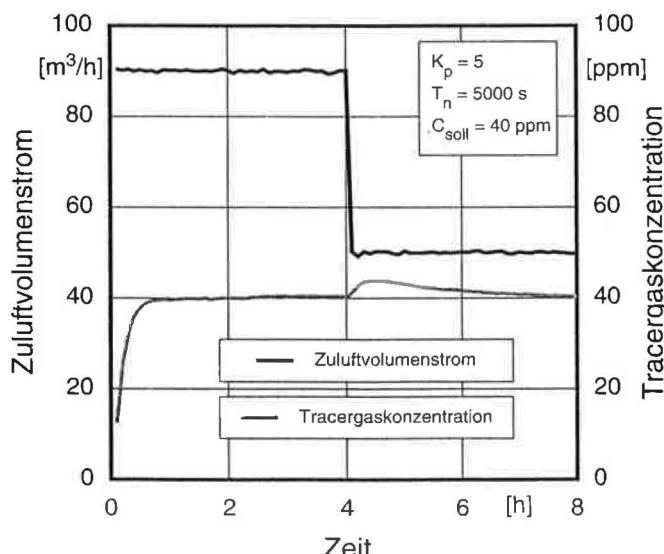


Bild 5. Führungs- und Störverhalten mit $K_p = 5$ und $T_n = 5000 \text{ s}$ bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Auswertung der Sprungantworten erfolgen nach dem in [26] beschriebenen Verfahren. Für die charakteristischen Kenngrößen der in *Bild 4* aufgeführten Sprungantwort ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} C(\infty) &= 257,14 \text{ ppm}; & 0,7 C(\infty) &= 180 \text{ ppm}; \\ t_{70} &= 4500 \text{ s}; & t_{70}/4 &= 1125 \text{ s}; \\ C(t_{70}/4) &= 70 \text{ ppm}. \end{aligned}$$

Damit folgt für das charakteristische Verhältnis $C(t_{70}/4)/C(\infty) = 0,272$. Es handelt sich somit um ein PT_1 -Glied. Die nach [26] ermittelte Zeitkonstante und die Streckenverstärkung ergeben sich zu $T_1 = 3750 \text{ s}$ und $K_s = 0,875 \text{ ppm min/ml}$. Für die Dimensionierung des Reglers ist nur diese Zeitkonstante maßgebend, da die beiden anderen bekannten Zeitkonstanten T_2 und T_3 im Verhältnis zu T_1 sehr klein sind. Da die Möglichkeit besteht, die Störgröße bei der Aufnahme der Sprungantwort zu variieren, werden bei verschiedenen Zuluftvolumenströmen Sprungantworten aufgenommen. Ergebnis dieser Untersuchung ist, daß das Zeitverhalten und die Verstärkung der Strecke von der Störgröße abhängig ist.

Je größer der Luftwechsel ist, desto kleiner wird die Zeitkonstante und die Verstärkung der Strecke. Die Zeitkonstante T_2 und die Verstärkung K_s variieren wie folgt:

von $T_2 = 2500 \text{ s}$	bei $\dot{V}_{zu} = 90 \text{ m}^3/\text{h}$
bis $T_2 = 4420 \text{ s}$	bei $\dot{V}_{zu} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$
von $K_2 = 0,71 \text{ ppm min/ml}$	bei $\dot{V}_{zu} = 90 \text{ m}^3/\text{h}$
bis $K_2 = 1,21 \text{ ppm min/ml}$	bei $\dot{V}_{zu} = 50 \text{ m}^3/\text{h}$

Da bei den meßtechnischen Untersuchungen der Fensterlüftung Volumenströme $<50 \text{ m}^3/\text{h}$ auftreten können und der Regler so dimensioniert werden sollte, daß immer die größte Zeitkonstante kompensiert wird, erfolgt die Festlegung $T_n = 5000 \text{ s}$. Die Sprungantwort für einen Zuluftvolumenstrom von $36 \text{ m}^3/\text{h}$ kann nicht aufgenommen werden, da der Meßbereichsendwert des Gasanalysators sonst überschritten würde. Kann davon ausgegangen werden, daß der Zuluftvolumenstrom nicht diese kleinen Werte

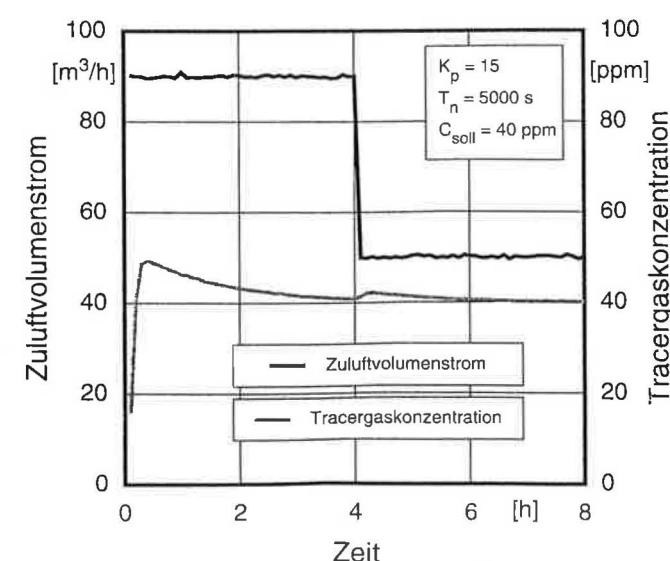


Bild 6. Führungs- und Störverhalten mit $K_p = 15$ und $T_n = 5000 \text{ s}$ bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

erreicht, empfiehlt es sich, die Zeitkonstante zu verringern, um ein besseres Regelverhalten zu erzielen.

Die Verstärkung des Regelkreises wird empirisch durch die Aufnahme von Führungs- und Störsprüngen bestimmt. Die Bilder 5 und 6 zeigen das Führungs- und Störverhalten des Regelkreises bei einem Sprung des Zuluftvolumenstroms von 90 auf 50 m³/h nach einer Zeit von 4 Stunden. Der Sollwert der Tracergaskonzentration ist dabei mit 40 ppm vorgegeben.

Aus den dargestellten Verläufen der Tracergaskonzentration ist zu erkennen, daß das Störverhalten bei größerer Reglerverstärkung besser wird. Das Führungsverhalten hingegen verschlechtert sich, wobei das Überschwingen bei $K_p = 15$ nicht charakteristisch ist, da das Stellglied bei dieser Verstärkung bereits an die obere Begrenzung gelangt. Die Verstärkung des Reglers darf nicht zu groß gewählt werden, da einerseits der Stellwert (Tracergaszufuhr) zu starke Schwankungen aufweist und andererseits das schlechte Führungsverhalten eine lange Anlaufzeit der Messung bedeuten kann. Als Wert für die Verstärkung wird deshalb $K_p = 10$ gewählt. Diese Vorgehensweise der empirischen Reglereinstellung hat sich bei den durchgeführten Messungen sehr gut bewährt.

5. Messungen

Der Einsatz der Tracergasmeßtechnik zur Bestimmung des Luftwechsels basiert auf der Gültigkeit der in Abschn. 2 getroffenen Aussagen zur Modellbildung, zu den prinzipiellen Voraussetzungen und zum Auswerteverfahren. Weiterhin ist die Auswahl der geeigneten Komponenten des Versuchsaufbaus und die sorgfältige Durchführung der Messungen von entscheidender Bedeutung.

Die auf der Bilanzierung der Tracergas-Massenströme basierende Modellbildung in Kap. 3 berücksichtigt eine mögliche Tracergaskonzentration in der Außenluft. In [3] wird die Umgebungskonzentration von N₂O mit 0,32 ppm angegeben. Zur Überprüfung dieser Aussage werden über

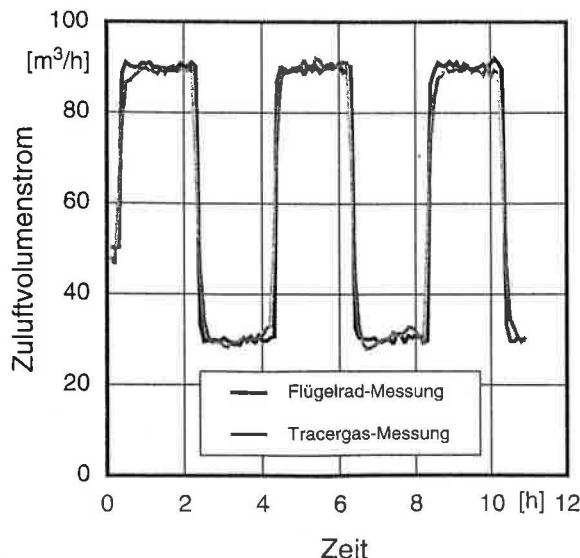


Bild 7. Darstellung der Zuluftvolumenströme über die Lüftungsanlage zum Vergleich zwischen Flügelrad- und Tracergas-Messung.

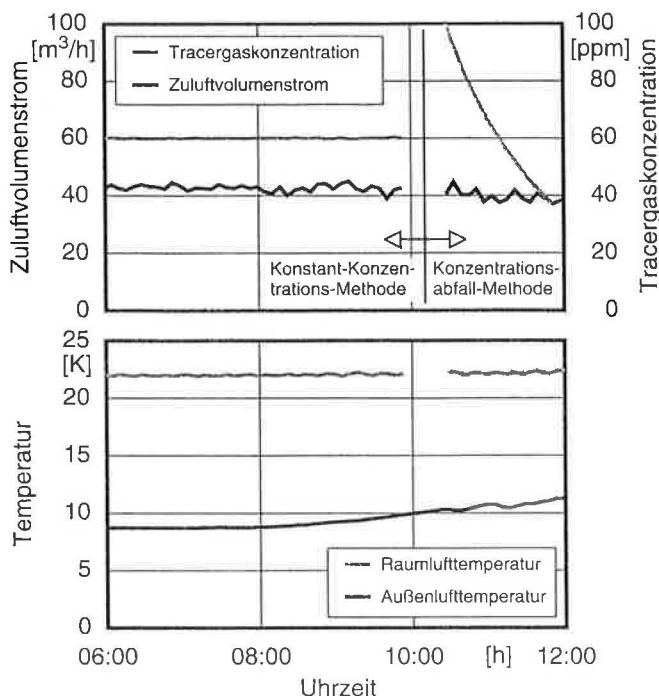


Bild 8. Vergleich der Meßmethoden Konstant-Konzentration und Konzentrationsabfall. Kippfenster 6 cm geöffnet.

den Zeitraum eines Jahres verteilt Messungen der Außenluftkonzentration durchgeführt, und es ergeben sich Werte zwischen 0,3 und 0,8 ppm. Vereinfachend wird für die Auswertung der Meßergebnisse gem. Gl. (12) im weiteren ein Mittelwert von 0,5 ppm herangezogen.

Die Validität des Meßverfahrens wird anhand einer Vergleichsmessung mit der mechanischen Lüftungsanlage durchgeführt. Der über die Lüftungsanlage zugeführte Luftvolumenstrom wird mittels eines an einer Blendemeßstrecke kalibrierten Flügelradannemometers gemessen und in unterschiedlichen Bereichen variiert. Als Beispiel ist in Bild 7 der zeitliche Verlauf des Zuluftvolumenstroms, ermittelt über die Flügelradmessung und die Tracergasmessung mit der Auswertung gem. Gl. (12), dargestellt. Weitere umfangreiche Untersuchungen an dem betrachteten Versuchsaufbau sind in [24] und [27; 28] dokumentiert. Hieraus lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die Modellbildung und das abgeleitete Auswerteverfahren repräsentieren die tatsächlichen Verhältnisse.
- Das Störverhalten des Regelungssystems ist ausreichend stabil.
- Der Einfluß von Sorptionsvorgängen des N₂O an den Raumumschließungsflächen macht sich bei den Messungen nicht bemerkbar, was darauf hindeutet, daß der Sorptionsanteil in geringen Größenordnungen liegt. Denkbar ist allerdings auch ein Sättigungseffekt, da die Messungen kontinuierlich durchgeführt werden [Raatschen, pers. Mitteilung 21.4.95].
- Der Raumventilator erzeugt eine ausreichende Durchmischung der Raumluft mit dem Tracergas.

Eine weitere Überprüfung hinsichtlich der Anwendbarkeit der Meß- und Auswerteverfahren wird anhand einer

exemplarischen Messung bei geöffnetem Kippfenster mit 6 cm Weite durchgeführt. In zwei direkt aufeinanderfolgenden Meßreihen wird der Zuluftvolumenstrom einmal mittels der Konstant-Konzentrations-Methode und einmal mit der Konzentrationsabfall-Methode bestimmt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, erfolgen die Messungen unter annähernd gleichen meteorologischen Randbedingungen, d. h. die Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft ist näherungsweise konstant, und die Windgeschwindigkeit ist mit Werten unter 0,5 m/s vernachlässigbar klein. In Bild 8 ist der zeitliche Verlauf der Tracer-gaskonzentration, der resultierenden Zuluftvolumenströme sowie der Raum- und Außenlufttemperatur für die beiden Messungen dargestellt. Es zeigt sich ein sehr stabiles Regelverhalten im linken Bereich des oberen Bildes, was auf die nur geringen Störgrößenänderungen zurückzuführen ist. Es treten lediglich Schwankungen in der Raumlufttemperatur auf, welche durch die 2-Punkt-geregelte Heizung hervorgerufen werden. Diese führen wiederum zu leichten Änderungen des Zuluftvolumenstroms.

Im Bereich der Konzentrationsabfall-Messung fällt die Tracer-gaskonzentration exponentiell von 100 auf 37 ppm. Der Luftaustausch nimmt leicht ab, da im zeitlichen Verlauf dieser Messung die Temperaturdifferenz innen/außen etwas kleiner wird. Der zugrunde gelegte Auswertezeitraum Δt in den Gln. (12) und (16) beträgt jeweils 0,1 h.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß sich beide Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels eignen und zu gleichen Ergebnissen führen. Die Konstant-Konzentrations-Methode hat dabei den Vorteil, daß sie zur kontinuierlichen Erfassung geeignet ist.

6. Fehlerbetrachtung

6.1 Konstant-Konzentrations-Methode

Der zufällige Fehler einer Einzelmessung des Zuluftvolumenstroms wird mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Auswertebeziehung in Gl. (12) angegeben. Vernachlässigt man den Fehlereinfluß bei der Bestimmung der Außen- und Raumlufttemperatur und des Raumvolumens aufgrund der geringen Beträge und geht näherungsweise von $T_{zu}/T_i \approx 1$ aus, ergibt sich die mittlere quadratische Abweichung des Zuluftvolumenstroms zu

$$(\delta \dot{V}_m)^2 = \left| \frac{1}{\Delta C_m(t)} \delta F \right|^2 + \left| \frac{F}{\Delta C_m(t)^2} \delta C \right|^2 + \\ + \left| \frac{V}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t)} \delta C \right|^2 + \left| \frac{V}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t + \Delta t)} \delta C \right|^2 \quad (17)$$

mit

$$\delta C = \delta(\Delta C_m(t)) = \delta(\Delta C(t)) = \delta(\Delta C(t + \Delta t))$$

Der Meßfehler des Tracer-gasvolumenstroms wird vom Gerätetersteller mit $\pm 1\%$ angegeben und beträgt für den vorliegenden Meßbereich $\pm 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$.

Der Fehler der N_2O -Konzentrationsmessung ergibt sich aus folgenden Anteilen:

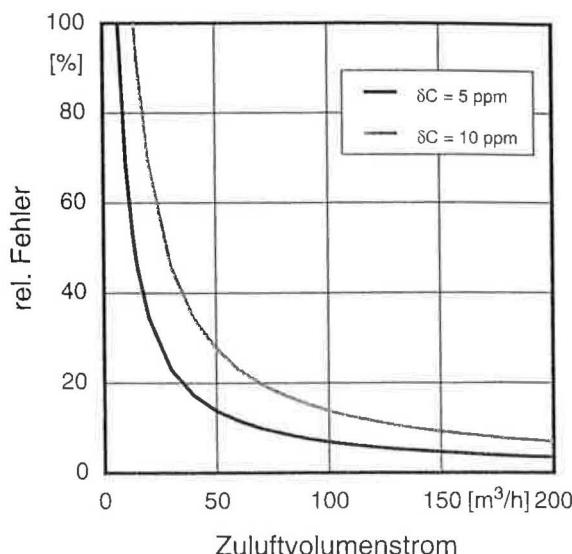


Bild 9. Relativer Fehler $\delta \dot{V}_m / \dot{V}_m$ in Abhängigkeit vom Zuluftvolumenstrom bei einem Auswertezeitraum von einer Stunde.

- Die Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift des Gasanalysators beträgt nach Herstellerangaben bis 2 ppm pro Woche. Es werden in regelmäßigen Abständen Nullpunkt- und Empfindlichkeitskalibrierungen durchgeführt und die Meßwerte werden unter Annahme einer zeitlich lineareren Drift korrigiert. Die Empfindlichkeitskalibrierung erfolgt mit einem Gasgemisch N_2O in N_2 bei einer Konzentration von $90,4 \pm 2$ ppm.
- Der Linearitätsfehler des Analysators beträgt bis 1 % der Meßspanne.
- Unvollständige Vermischung des Tracer-gases mit der Raumluft.

In [29] wird für eine Beispielrechnung der Fehler einer Konzentrationsmessung, der aus den o. g. Punkten folgt, mit 10 ppm angesetzt und resultiert im wesentlichen aus der Unsicherheit hinsichtlich des Vermischungskriteriums. Für Einzelmessungen in Felduntersuchungen liegt dieser Wert sicherlich in einer realistischen Größenordnung. Umfangreiche Untersuchungen in dem betrachteten Versuchsgebäude, die in [27; 28] dokumentiert sind, zeigen, daß unter Laborbedingungen eine hohe Güte der Durchmischung erreicht wird und damit der Meßfehler der Konzentration geringer einfällt. Eine genaue Quantifizierung des Konzentrationsmeßfehlers ist für die durchführten Meßreihen nicht möglich und kann nur schätzungsweise mit 5 ppm angegeben werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Fehleranteile in Gl. (17) wird deutlich, daß der letzte Term, der die zeitliche Änderung der Tracer-gaskonzentration berücksichtigt, den Gesamtfehler bestimmt (vgl. [29]).

Mit der vereinfachten Annahme, daß die mittleren Tracer-gaskonzentrationen in Gl. (17) dem Sollwert, der beispielhaft mit 60 ppm vorgegeben ist, entsprechen und unter Berücksichtigung des Auswerteintervalls von einer Stunde, ergibt sich der absolute Fehler des Zuluftvolumenstroms zu $9,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

Der relative Fehler des Zuluftvolumenstroms ist im Bereich von 0–200 m³/h in Bild 9 aufgetragen. Hierbei ist

zum Vergleich auch der relative Fehler aufgeführt, der sich bei einem Konzentrationsmeßfehler von $\delta C = 10 \text{ ppm}$ ergibt.

6.2 Konzentrationsabfall-Methode

Für die Konzentrationsabfall-Methode kann die mittlere quadratische Abweichung des Luftwechsels aus Gl. (16) mit

$$(\delta n_m)^2 = \left| \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t)} \delta C \right|^2 + \left| \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{\Delta C(t + \Delta t)} \delta C \right|^2 \quad (18)$$

bestimmt werden. Wie zuvor in Abschnitt 6.1 wird der Fehlereinfluß der Temperaturmessung vernachlässigt. Ebenso gilt

$$\delta C = \delta(\Delta C(t)) = \delta(\Delta C(t + \Delta t))$$

Werden in Gl. (18) die Ausgangskonzentration $C(t)$ und der Fehler δC als konstante Werte angesehen, fällt der Fehler δn schnell mit wachsender Auswertezeit t ab. Durch die Verringerung der Tracergaskonzentration $\Delta C(t + \Delta t)$ ergibt sich aber mit zunehmendem Auswertezeitraum ein wachsender Einfluß des Fehlers δC , so daß ab einer bestimmten Meßdauer δn wieder größer wird. Dies zeigt auch die folgende Betrachtung für den relativen Fehler $\delta n_m/n_m$. Gl. (18) wird umgeformt zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \sqrt{\left(\frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)} \right)^2 + \frac{\delta C^2 e^{-2n_m \Delta t}}{\Delta C(t)^2 e^{-2n_m \Delta t}}} \quad (19)$$

Aus Gl. (16)

$$n_m = \frac{T_{zu}}{T_i} \frac{1}{\Delta t} \left\{ \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)} \right\} \quad (16)$$

folgt

$$\Delta C(t + \Delta t) = \Delta C(t) e^{-T_i/T_{zu} n_m \Delta t} \quad (20)$$

Trifft man wiederum die Vereinfachung $T_i / T_{zu} \approx 1$ und quadriert Gl. (20) erhält man

$$\Delta C(t + \Delta t)^2 = \Delta C(t)^2 e^{-2n_m \Delta t} \quad (21)$$

Der relative Fehler des Luftwechsels führt nach Einsetzen von Gl. (20) in Gl. (19) zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \sqrt{\left(\frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)} \right)^2 (1 + e^{-2n_m \Delta t})} \quad (22)$$

oder

$$\frac{\delta n_m}{n_m} = \frac{1}{n_m \Delta t} \frac{\delta C}{\Delta C(t + \Delta t)} + \sqrt{1 + e^{-2n_m \Delta t}} \quad (23)$$

Ein Minimum ergibt sich etwa bei einer Auswertezeitspanne $t = \tau_n = 1 / n_m$. Der relative Fehler führt dann zu

$$\frac{\delta n_m}{n_m} \approx 1,06 \frac{\delta C}{C(\tau_n)} \approx 2,9 \frac{\delta C}{C(t)} \quad (24)$$

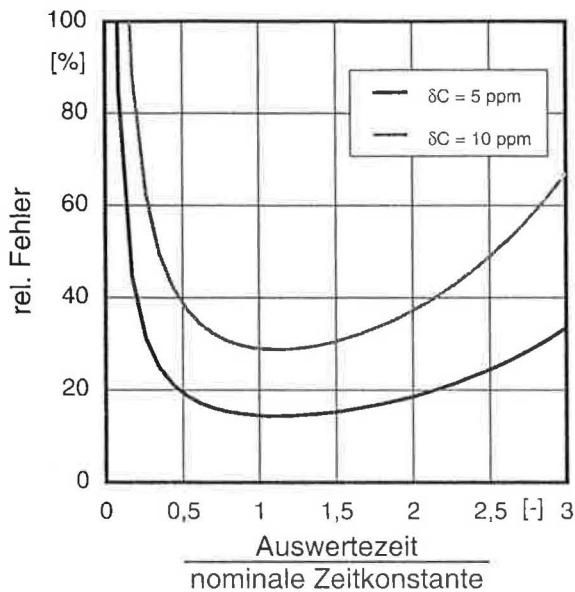


Bild 10. Relativer Fehler $\delta n_m/n_m$ in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Auswertezeit zu nominaler Zeitkonstante (Ausgangskonzentration 100 ppm).

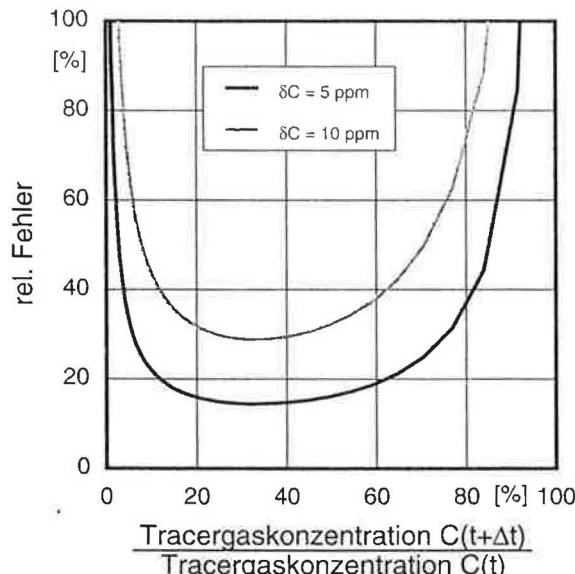


Bild 11. Relativer Fehler $\delta n_m/n_m$ in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Tracergaskonzentrationen aufeinanderfolgender Meßzeitpunkte (Ausgangskonzentration 100 ppm).

Der Verlauf des nach Gl. (23) bestimmten relativen Fehlers ist in Bild 10 über dem Verhältnis von Auswertezeitraum zu nominaler Zeitkonstante dargestellt. Bild 11 zeigt die Abhängigkeit des relativen Fehlers des Luftwechsels vom Verhältnis $C(t + \Delta t) / C(t)$. Der kleinste Fehler resultiert, wenn die Ausgangskonzentration $C(t)$ auf ca. 37% abgesunken ist (vergl. [3]). Den Berechnungen für die in Bild 10 und 11 dargestellten Abhängigkeiten sind jeweils Ausgangskonzentrationen von 100 ppm und Konzentrationsmeßfehler von 5 bzw. 10 ppm zugrunde gelegt.

Literatur

- [1] Jung, A. und Zeller, M.: Bestimmung der Lüftungseffektivität von Zuluftdurchlässen bei Umluftbetrieb. *Gesundheits-Ingenieur* 118 (1997) H. 3, S. 121–131.
- [2] Maus, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel, 1995.
- [3] Roulet, C.-A. und Vandaele, L. (Hrsg.): Airflow Patterns within Buildings Measurement Techniques. Air Infiltration and Ventilation Centre, Technical Note 34, Oscar Faber Partnership (1991).
- [4] Hartmann, P.; Pfiffner, I. und Bargetzki, S.: Luftwechsel-Meßwerte von ausgewählten Wohnbauten in der Schweiz. *KI – Klima-Kälte Ingenieur* (1978) H. 3, S. 233–237.
- [5] Grot, R. und Lagus, P.: Application of Tracer Gas Analysis to Industrial Hygiene Investigations. 12th AIVC Conference „Air Movement and Ventilation Control Within Buildings“ 1991, Band 1, Ottawa, Canada, S. 411–471.
- [6] Raatschen, W.: Was ist Lüftungseffektivität? *KI Klima-Kälte-Heizung* (1988) H. 5, S. 226–231, H. 6, S. 291–296, H. 7–8, S. 331–334.
- [7] Amara, F.; Depecker, P. und Allard, F.: OPTIBAT: A Real Scale Cell in Simulated Climatic Environment for Multizone Air Flow Pattern in Building. 13th AIVC Conference „Ventilation for Energy Efficiency and Optimum Indoor Air Quality“ 1992, Nice, Frankreich, S. 519–527.
- [8] Brouns, C. E. und Waters, J. R.: A Four Zone Ventilation Test Facility. 14th AIVC Conference „Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration“ 1993, Copenhagen, Dänemark, S. 493–507.
- [9] Dorer, V. und Fürbringer, J.-M.: Comparison of Multizone Air Flow Measurements & Simulations of the LESO Building Including Sensitivity Analysis. 14th AIVC Conference „Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration“ 1993, Copenhagen, Dänemark, S. 587–595.
- [10] Raatschen, W.: Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. Teil 1. *Gesundheits-Ingenieur* 116 (1995) H. 2, S. 78–112.
- [11] Stymne, H. und Eliasson, A.: A New Passive Tracer Gas Technique for Ventilation Measurements. 12th AIVC Conference „Air Movement and Ventilation Control Within Buildings“ 1991, Band 3, Ottawa, Canada, S. 1–17.
- [12] Ducarme, D.; Vandaele, L. und Wouters, P.: Single-sided Ventilation: A Comparison of the Measured Air Change Rates with Tracer Gas and with the Heat Balance Approach. 15th AIVC Conference „The Role of Ventilation“ 1994, Buxton, U. K., S. 67–76.
- [13] Charlesworth, P. S. (Hrsg.): Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques – An Applications Guide. Air Infiltration and Ventilation Centre, Oscar Faber Partnership (1988).
- [14] Heidt, F.-D.: Fortschritte bei der Luftwechselmessung durch Mikrocomputereinsatz. *HLH* 38 (1987) Nr. 8, S. 391–395.
- [15] Lobeck, W. und Masuhr, F.: Praktische Luftwechselermittlung. *HLH* 41 (1990) H. 12, S. 968–974 und S. 1051–1056.
- [16] Alexander, D. K.; Etheridge, D. W. und Gale, R.: Experimental Techniques for Ventilation Research. AIC Conference „Instrumentation and Measuring Techniques“ 1980, Cumberland Lodge, Windsor, U.K.
- [17] Rabenstein, R.: Weiterentwicklung und Erprobung von Methoden der Luftwechselmessung in Räumen und Gebäuden. Forschungsbericht, Universität GH Siegen, Ingenieurphysik, 1990.
- [18] Sherman, M. H.: A Multitracer System for Multizone Ventilation Measurement. University of Carolina, Lawrence Berkeley Laboratory, Applied Science Division, Indoor Environment Program, LBL-29010, 1980.
- [19] Schulze, H. D. und Schuschke, G.: Studie über Notwendigkeit und Zuverlässigkeit von Luftwechsel- und Luftpolumenstrommessungen. *Gesundheits-Ingenieur* 111 (1990) H. 1, S. 12–16.
- [20] Rabenstein, R. und Heidt, F. D.: A New Control Algorithm for the Measurement of Variable Air Change Rates. 12th AIVC Conference „Air Movement and Ventilation Control Within Buildings“ 1991, Band 2, Ottawa, Canada, S. 153–166.
- [21] Sandberg, M. und Blomqvist, C.: A Quantitative Estimate of the Accuracy of Tracer Gas Methods for the Determination of the Ventilation Flow Rate in Buildings. *Building and Environment* 20 (1985) H. 4, S. 139–150.
- [22] Compagnon, R.; Koehler, A.; Roecker, C. und Roulet, C.-A.: Development of an Efficient Control Algorithm for a Multizone Constant Concentration Tracer Gas Air Infiltration Measurement System. 9th AIVC Conference 1988 „Effektive Ventilation“, Gent, Belgien, S. 103–121.
- [23] Axley, J.: An Integral Mass Balance Formulation of the Constant Concentration Tracer Technique. 12th AIVC Conference „Air Movement and Ventilation Control Within Buildings“ 1991, Band 3, Ottawa, Canada, S. 39–49.
- [24] Oppermann, J.: Experimenteller Aufbau und regelungstechnische Untersuchungen zur Ermittlung des Luftwechsels in natürlich gelüfteten Räumen. Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Elektrotechnik, 1994.
- [25] Latzel, W.: Theoretische und experimentelle Methoden der Regelungstechnik, Band 13 – Regelung mit dem Prozessrechner (DDC). Bibliographisches Institut – Wissenschaftsverlag, Zürich, 1977.
- [26] Spöner, J.: Script zur Vorlesung „Grundlagen der Regelungstechnik“ Universität-Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Regelungstechnik, 1991.
- [27] Behr, N. und Fuß, E.: Aufbau einer Meßeinrichtung zur Ermittlung von Luftwechselraten. Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Maschinenbau, 1992.
- [28] Volkmann, H.: Ermittlung der Lüftungseffektivität mit der Konzentrationsabfall-Methode. Diplomarbeit, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Maschinenbau, 1993.
- [29] Sherman, M. H.: Tracer-Gas Techniques For Measuring Ventilation in a Single Zone. *Building and Environment* 25 (1990) H. 4, S. 365–374.

Patentschau**Verfahren und Vorrichtung zum Verarbeiten von Klärschlamm**

DE-PS 19515488, Veröff.-Tag der Patenterteilung: 14.12.95, Patentinhaber: Hochwald-Ton-GmbH, 66620 Nonnweiler

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Verarbeiten von Klärschlamm durch Mischen eines teilentwässerten, stabilisierten Klärschlamm mit einem mineralischen Roh-

stoff und einer Vorrichtung hierzu. Zur Aufbereitung der Klärschlämme zu einem in Böden austragbaren Sekundärrohstoff mit vermindertem Gefahrenpotential ist vorgesehen, dass 40 bis 70 Gew.-% Klärschlamm mit einem Trockengehalt von etwa 15% bis 30% mit 60 bis 30 Gew.-% eines ersten Versatzanteils eines zerkleinerten mineralischen, einen Tonmineralanteil mit einem Hauptbestandteil an Zweischichttonmineralien, deren Kationenaustauschkapazität aufgrund eines zumindest niedrigen Diagenesegrades erhöht ist, oder aus einem oder mehreren Zweischicht- oder Dreischichttonmineralien aufweisenden Rohstoffs zugegeben, zum Abtöten von im Klär-