

**5**

# **Tracer-Gas-Messverfahren**

---

Theoretisches Grundwissen

**Inhalt:**

- Wiederholung Grundlagen der Belüftungstechnik
- Erklärungen zu dem Tracer-Gas-Messsystem
- Grundlagen Tracer-Gas-Messmethoden

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung .....	134
2. Zweck einer Belüftung .....	135
3. Erforderlicher Mindestaußenluftvolumenstrom .....	136
4. Tracer-Gas-Messsystem (Spurengas-Messverfahren) .....	137
4.1 Informationen zum Spurengas (Tracer Gas) .....	140
4.2 Funktionsprinzip des Messgerätes .....	141
4.3 Die Tracer-Gas Messmethoden .....	143
4.3.1 Die „concentration decay“ Messmethode .....	144
4.3.2 Die „constant emission“ Messmethode .....	145
4.3.3 Die „constant concentration“ Messmethode .....	146
4.3.4 Übersicht der Messmethoden .....	147
5. Literaturverzeichnis .....	148

## 1. Einleitung

In naher Zukunft ist absehbar, dass Neubauten nur noch als Niedrig-Energie- und Passivhäuser errichtet werden. Besonders bei dieser modernen Bauart muss entscheidend auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle geachtet werden, um die energetischen Vorteile im Vergleich zu traditionelleren Bauweisen voll ausschöpfen zu können.

Zu den entscheidenden Vorteilen dieser luftdichten Bauweise gehören:

- Minderung des Geräuschpegels von außen,
- Vermeidung von Bauschäden durch Dampfkondensation,
- keine Zugerscheinungen durch undichte Bauteile,
- und vor allem keine Wärmeverluste durch *unkontrollierte Lüftung*.

(Quelle: Herbert Zierhut, Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 678)

Unkontrollierte Lüftung ist auf baulich bedingte Undichtheiten (z.B. an Fenstern, Türen, Rolladenkästen durch Fugen im Mauerwerk usw.) am Gebäude zurückzuführen. Sie wird insbesondere durch windiges Wetter oder durch Luftdruckunterschiede zwischen dem Außenbereich und dem Inneren des Gebäudes verstärkt. Bei dieser **natürlichen Belüftung** erfolgt der Luftaustausch ohne Hilfe von mechanischen oder elektrischen Belüftungseinrichtungen. Das gezielte Öffnen von Türen oder Fenstern wird ebenfalls als natürliche Belüftung angesehen. Leider ist eine Kontrolle der Luftmengen dabei kaum möglich.

Erfolgt die Lüftung eines Gebäudes kontrolliert, wird versucht zum passenden Zeitpunkt und in ausreichender Menge den Luftvolumenstrom in bzw. aus dem Gebäude zu steuern. Für diesen **erzwungenen Luftaustausch** sorgen mechanisch oder elektrisch betriebene Lüfter. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Lüftungsanlagen, bei Luft/Luft-Wärmetauschern, die in Lüftungsöffnungen an der Außenwand eines Gebäudes angebracht werden oder bei Klimaanlage. Während Lüftungsanlagen reine Zuluft- und Abluftanlagen sind, werden in Klimaanlage (RLT-Anlagen) zudem Lufttemperatur und Luftfeuchte der Räume automatisch auf gewünschte Werte gebracht werden.

## 2. Zweck einer Belüftung

Eine Gebäudebelüftung muss Aufgaben erfüllen wie:

- verbrauchte Luft durch „Frischluft“ austauschen und so für den notwendigen Luftwechsel sorgen
- zum Abkühlen des Gebäudes „warme“ Luft durch „kältere“ austauschen (Klimatisierung)
- anfallende Feuchtigkeit evakuieren, um einer Schimmelpilzbildung entgegen zu wirken

Eine gute Belüftung trägt entscheidend zum Wohlfühlgefühl der Personen bei, die sich am betreffenden Ort aufhalten. Der Mensch fühlt sich zum Beispiel unbehaglich, wenn die Temperaturregelung des Körpers zu sehr beansprucht wird. Dies ist der Fall bei starken Luftbewegungen wie Durchzug, bei zu niedrigen oder zu hohen Luft- und Wandtemperaturen, bei zu niedriger oder zu hoher Luftfeuchte...Der Körper reagiert durch Wärmestauungen oder durch übermäßigen Wärmeverlust.

*(Vgl.: Herbert Zierhut, Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 593)*

Auch die Sauberkeit der Luft beeinflusst Behaglichkeit und Wohlbefinden positiv. Verunreinigungen der Luft werden hauptsächlich durch den menschlichen Stoffwechsel, u.a. CO<sub>2</sub>, durch Gerüche, Wasserdampf und VOC (Volatile-Organic-Components) verursacht

*(Vgl.: Herbert Zierhut, Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 604).*

Weitere Quellen der Luftverunreinigung sind Ausdunstungen von Farben und Materialien wie zum Beispiel Kunststoffen, Abgase die bei Verbrennungsvorgängen entstehen, Zigarettenrauch, Sporen von Schimmelpilzen usw. Im Schnitt muss einer erwachsenen Person 20 bis 30m<sup>3</sup> frische Luft pro Stunde zugeführt und die verbrauchte Luft entsprechend abgeführt werden, wenn ein ausreichendes Wohlfühlgefühl sichergestellt sein soll.

### 3. Erforderlicher Mindestaußenluftvolumenstrom

Wie viel Frischluft einem Raum theoretisch zugeführt werden muss, kann anhand von unterschiedlichen Normen rechnerisch oder tabellarisch ermittelt werden.

Für den Fall, dass der Raum nicht von Personen benutzt wird, ist die Bodenfläche für den theoretischen Mindestaußenluftvolumenstrom ausschlaggebend. Befinden sich im Raum Personen, so sind die Anzahl der Personen und die geforderte Luftqualität von Bedeutung. Die Raumlufqualität wird aus messtechnischen Gründen oft anhand des CO<sub>2</sub>-Gehaltes quantifiziert, so erfolgt zum Beispiel in der Norm DIN EN 13779 eine Klassifizierung der Raumlufqualität nach IDA-Wert (IDA steht für „Indoor air“). In der Norm wird gleichzeitig, in Abhängigkeit des erstrebten IDA-Wertes, ein Mindestaußenluftvolumenstrom gefordert. (Vgl.: Herbert Zierhut, *Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 600*)

Zu bemerken ist, dass der in der Aussenluft gemessene CO<sub>2</sub>-Gehalt in den letzten Jahren erheblich angestiegen ist. Die in der Atmosphäre gemessene mittlere Konzentration von CO<sub>2</sub> liegt im Moment bei etwa 400 ppm. (Quelle: [wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid](http://wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid))

Werden Außenluftvolumenstrom und Raumvolumen in ein Verhältnis zueinander gesetzt, erhält man den Luftwechsel  $n$  (auch noch globale Luftwechselzahl):

Es gilt: 
$$n = \frac{\dot{V}_A}{V_R} \quad (3.1)$$

Mit

$n$	Luftwechsel in $\frac{1}{h}$
$\dot{V}_A$	Außenluft-Volumenstrom in $\frac{m^3}{h}$
$V_R$	Raumvolumen in $m^3$

Man kann, abhängig vom Außenluftvolumenstrom, zwischen unterschiedlichen Lüftungsarten unterscheiden. Dabei geht man von einer bestimmten **Nennlüftung** aus. Sie ist die notwendige Lüftung zur Gewährleistung der hygienischen Anforderungen sowie des Bautenschutzes bei Anwesenheit der Bewohner (Normalbetrieb).

**Reduzierte Lüftung** ist die Mindestlüftung zur Gewährleistung der hygienischen Mindestanforderungen sowie des Bautenschutzes unter üblichen Nutzungsbedingungen bei teilweise reduzierten Feuchte- und Stofflasten.

**Intensivlüftung** ist zeitweilig notwendig, um Lastspitzen zu beseitigen.

(Vgl.: Herbert Zierhut, *Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 677*)

Wenn durch Infiltration an Fenstern, Außentüren usw. eine natürliche Belüftung sicher gestellt ist, die Bewohner durch ausreichende Fensterlüftung für die Nennlüftung sorgen und bei Bedarf auch intensiv lüften, sind keine weiteren technischen Maßnahmen zur Belüftung notwendig. Allerdings entstehen insbesondere zur kalten Jahreszeit recht hohe Lüftungs-Wärmeverluste.

Bei modernen Neubauten, wo ein erzwungener Luftaustausch aufgrund der hohen Dichtheit erforderlich ist, müssen Lüftungsanlagen situationsangepasst für einen ausreichenden Außenluftvolumenstrom sorgen. Dies setzt eine intelligente, unter Umständen raumabhängige Steuerung des Belüftungssystems voraus, um z.B. unnötige Antriebsleistung für Ventilatoren einsparen zu können. Dies wird aber leider noch nicht standardmäßig im Wohnbereich eingesetzt. Der Stromverbrauch der Ventilatoren muss durch die Wärmerückgewinnung aus der Abluft kompensiert werden, was nicht immer der Fall ist. Allerdings ist bei solchen Systemen die Luftqualität durchwegs höher wie bei einer natürlichen Belüftung.

#### **4. Tracer-Gas-Messsystem (Spurengas-Messverfahren)**

Jede Art der Belüftung, ob natürlich oder erzwungen, soll, unter Berücksichtigung von Kriterien wie z.B. dem Wohlfühlgefühl der Raumbenutzer, möglichst effizient für einen Luftaustausch sorgen. Häufig stimmen leider die berechneten Soll-Luft-Volumenströme nicht mit den wirklichen Verhältnissen überein, weil die Dichtheit der Gebäudehülle schwer rechnerisch ermittelt werden kann und sie sich mit der Dauer verschlechtert. (Vgl.: Herbert Zierhut, *Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; Seite 634*)

Den Nachweis für einen ausreichenden Luftaustausch können unterschiedliche Messsysteme liefern. Sie ermöglichen auch eine Aussage darüber, wie der Luftaustausch stattfindet.

In den meisten Fällen erfolgt eine Messung der Luftgeschwindigkeit oder des Luftdruckes. Ausgehend von diesen Größen kann anschließend Rückschluss auf andere Größen wie z.B. den Luftvolumenstrom gezogen werden. Typische Windmesser (Anemometer) sind Flügelrad-Anemometer, Hitzdraht-Anemometer oder Staurohre. Bei letzteren erfolgt eine Messung des Druckes der strömenden Luft.

Um die Luftführung im Raum optisch nachzuweisen, können im Zuluftkanal geeignete Rauchpatronen angezündet werden. Die Zuluft wird farblich gekennzeichnet. Ähnliche Vorgehensweisen werden in Windkanälen, insbesondere in der Flugzeugindustrie oder im Automobilbau, angewandt. Das Strömungsverhalten der Luft wird durch künstlich erzeugten, eingefärbten Nebel analysiert. Laminare oder turbulente Luftströmungen werden sichtbar wie die *Abbildungen 4.1 bis 4.3* beispielhaft verdeutlichen.



*Abbildung 4.1: Luftströmungen um eine Flugzeugtragfläche*



*Abbildung 4.2: Luftströmungen im Windkanal*



*Abbildung 4.3: Strömungsbild bei einem Drallauslaß einer RLT-Anlage.*

Eine farbliche Kennzeichnung der Frischluft zur Analyse des Luftaustausches an Gebäuden reicht jedoch nicht aus, um richtige Messergebnisse zu erhalten. Außerdem sind die Luftströmungen in Gebäuden komplex und werden durch unzählige Randbedingungen wie Außendruck, Außen- und Innentemperatur, Bewegungen der Bewohner usw. unkontrolliert beeinflusst.

Eine effizientere Methode die Luftströmungen zu messen, ist die Kennzeichnung der Luftströmung mit Tracer-Gas. Ein für die Gesundheit unbedenkliches, farb- und geruchsloses Gas wird der Zuluft beigemischt. Der molekulare Anteil des in die Frischluft eingebrachten Gases kann an unterschiedlichen Stellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und während verschiedenen Zeitdauern mit speziellen Messgeräten möglichst genau ermittelt werden. Die Auswertung erlaubt Rückschlüsse auf die Bewegung der Frischluft und die Vermischung der Frischluft mit der Umgebungsluft.

Ein entscheidender **Vorteil** dieses Tracer-Gas-Messverfahren ist, dass es an einem bewohnten Gebäude unter „normalen“ Alltagsbedingungen auch über längere Zeiträume eingesetzt werden kann. Die Messergebnisse sind realitätsnah, da Bewegungen der Bewohner, Aufenthaltsdauer in Räumen, Gewohnheiten bezüglich Lüften usw. mit berücksichtigt werden.

Von **Nachteil** ist, dass die Tracer-Gas-Messmethode nur eingesetzt werden kann, um bereits bestehende Belüftungssysteme auf ausreichende Funktionalität zu überprüfen. Insofern können die Auswertungen der Messergebnisse nur dazu dienen, eine vorgefundene Situation durch technische oder bauliche Veränderungen nachträglich zu optimieren.

#### 4.1 Informationen zum Spurengas (Tracer Gas)

Für das Tracer-Gas-Messverfahren kommen unterschiedliche Gassorten in Frage. Einige Kriterien sollten diese Gase jedoch alle erfüllen.

Dazu gehören:

- ungiftig für den Menschen sein,
- bereits in geringer Menge leicht in der Luftzusammensetzung nachweisbar sein,
- geringe Entzünd- und Entflammbarkeit haben,
- geringe Reaktionsfreudigkeit mit Gegenständen oder Substanzen im untersuchten Raum haben,
- eine Dichte besitzen, die zwecks guter Mischung, der Dichte der Luft nahe kommt.

Wenn viele Messungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, können auch die Kosten des Gases eine Rolle spielen. Ein billiges Gas, das ebenfalls als Tracer-Gas benutzt werden kann ist  $\text{CO}_2$ . Es lässt sich bereits mit relativ preisgünstigen Messgeräten identifizieren, hat aber den Nachteil, dass es z.B. nicht für Messungen in Räumen eingesetzt werden kann, wo sich gleichzeitig Menschen aufhalten. Dadurch, dass der Mensch ebenfalls  $\text{CO}_2$  ausstößt, würde dies die Ergebnisse verfälschen.

Für die durchgeführten Laborversuche wird Tetrafluorethan R134a,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$  verwendet. Es handelt sich um ein fluorhaltiges Kältegas, das flüssig in Flaschen bei etwa 5bar gelagert wird. Das Gas wird während der Messung über einen Druckminderer bei etwa 4bar in die Luft eingeleitet. Bei einem Druck von 4bar liegt der Siedepunkt des Gases bei  $8,8^\circ\text{C}$ . Bei normalen Raumtemperaturen sollte das Flüssiggas demnach sofort verdunsten.

Für die Auswertung der Messergebnisse sind einige Eckdaten wichtig:

- So beträgt z.B. das Dichteverhältnis  $\frac{\rho(\text{TracerGas})}{\rho(\text{Luft})}$  in etwa 3,86.
- Die molare Masse  $M_{\text{R134a}}$  des Tracer-Gases kann rechnerisch ermittelt werden (molekulare Zusammensetzung:  $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ ). Sie hat einen Wert von  $102,032 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ .



Abbildung 4.1.1: Für die Laborversuche benutztes Flüssiggas; R134a  
Anmerkung: R134a ist ein starkes Treibhausgas (Treibhauspotenzial bezogen auf 100Jahre = 1430)  
(vgl.: <http://www.wikipedia.com>)

## 4.2 Funktionsprinzip des Messgerätes

Für die Laborversuche werden Messgeräte der Firma Lumasense benutzt:

- ein Gasüberwachungsinstrument (gas monitoring device) Innova 1412 und
- ein 6-Kanal-Probennehmer (sampling/dosing unit) Innova 1303



Abbildung 4.2.1:  
Auf der Abbildung ist oben das „gas-monitoring-device“, und unten die „sampling/dosing unit“ zu sehen; Der rote Schlauch entspricht hier dem Tracer-Gas Dosierschlauch, die beiden grünen Schläuche wurden zur Probenentnahme benutzt.

Die eigentliche Messung erfolgt nach dem Prinzip der photoakustischen Spektroskopie auf Infrarotbasis (vgl. *Abbildung 4.2.2*). Gasmoleküle haben die Fähigkeit Licht zu absorbieren. Der Grad der Absorption ist proportional zur Gaskonzentration.

Ein Parabol-Spiegel fokussiert breitbandiges Infrarotlicht. Es wird über ein Chopper-Rad und über einen optischen Filter in eine geschlossene, photoakustische

Messzelle geleitet (vgl. Abbildung 4.2.2). Durch die Drehbewegung des Chopper-Rades wird das Licht „ein- und ausgeschaltet“ (moduliert). Der optische Filter ist ein Schmalband-Interferenzfilter für den Infrarotbereich. Er lässt nur Licht einer gewünschten Wellenlänge durch. Wird er abgestimmt auf das jeweils zu messende Gas, wird es möglich Gase selektiv messen zu können:

- für R134a                    8,2µm mit einer Bandbreite von 5,5%
- für CO<sub>2</sub>                    14,1µm mit einer Bandbreite von 7,5%

Stimmt die Lichtfrequenz also mit einem Absorptionsband des Gases in der Zelle überein, absorbieren die Gasmoleküle einen Teil des Lichts. Je höher die Konzentration des Gases in der Zelle ist, desto mehr Licht wird absorbiert. Beim Absorbieren der Energie erwärmt sich das Gas. Da sich das Gas in einer geschlossenen Kammer befindet, wird ein Druckanstieg verursacht. Aufgrund des Chopper-Rades steigt und fällt der Druck abwechselnd und ein akustisches Signal wird erzeugt. Dieses Signal wird von zwei Mikrofonen erfasst. Die elektrischen Ausgangssignale der beiden Mikrofone werden vor der Verarbeitung verstärkt.

(vgl.: <http://www.lumasenseinc.com>)

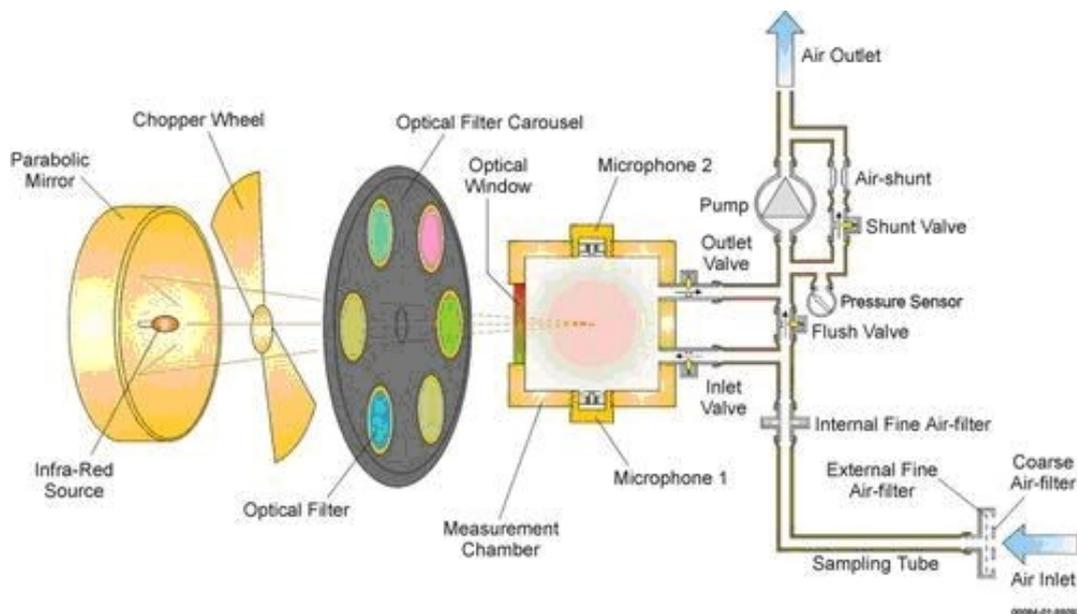


Abbildung 4.2.2: Funktionsprinzip des Lumasense Innova 1412

(Quelle: <http://www.lumasenseinc.com>)

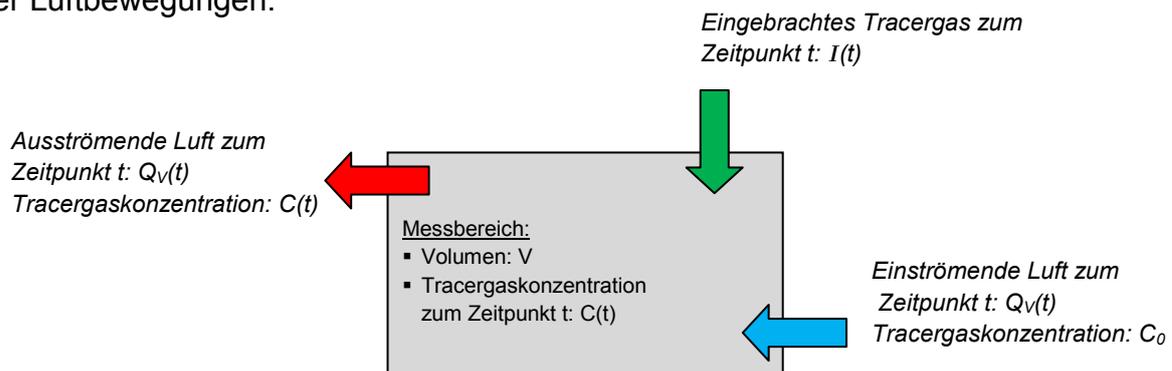
### 4.3 Die Tracer-Gas Messmethoden

Zur Bestimmung von Luftbewegungen bzw. des Luftaustausches in Räumen mit Hilfe des Tracer-Gas Verfahrens werden prinzipiell drei leicht unterschiedliche, Messmethoden angewandt:

- die „concentration decay“ Methode,
- die „constant-emission“ Methode,
- die „constant-concentration“ Methode.

(vgl.: Innova AirTech Instruments; Ventilation Measurements and other Tracer-Gas Applications)

Bei allen drei Methoden geht man von einer Gesamtbilanz aus: wenn eine bekannte Ausgangsmenge an Tracer-Gas in einen Messbereich mit einem bestimmten Volumen eingebracht wurde, dann entspricht die zeitliche Veränderung der Konzentration an Tracer-Gas der Ausgangsmenge an in den Raum gebrachten Tracer-Gas weniger der Verlustmenge an Tracer-Gas, bedingt durch Undichtheiten oder Luftbewegungen.



Die Gesamtbilanz lässt sich durch folgende Formel ausdrücken:

$$V * \frac{dC}{dt} = I(t) + C_0 * Q_V(t) - C(t) * Q_V(t) \quad (4.3.1)$$

Wobei:

$V$  = Luftvolumen im Messbereich z. B. in  $m^3$

$I$  = Zuführrate an Tracergas in den Messbereich z. B. in  $\frac{m^3}{s}$

$Q_V$  = Luftvolumenstrom in bzw aus dem Raum z. B. in  $\frac{m^3}{s}$

$C$  = Tracergaskonzentration im Raum z. B. in  $10^{-6} ppm$

$C_0$  = Tracergaskonzentration in der zugeführten Luft z. B. in  $10^{-6} ppm$

In vielen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass die von außen einströmende Luft nicht bereits Tracer Gas enthält. Die Stoffmengenkonzentration  $C_0$  kann in dem Fall null gesetzt werden.

Man erhält so aus Gleichung (4.3.1) für den Luftvolumenstrom  $Q_V$  in bzw. aus dem Messbereich:

$$Q_V(t) = \frac{I(t) - V \frac{dC}{dt}}{C(t)} \quad (4.3.2)$$

Mit den drei Messmethoden kann anhand der gemessenen Konzentrationswerten an Tracer-Gas, der Luftwechsel  $n$  (vgl. Gleichung 3.1) bestimmt werden.

#### 4.3.1 Die „concentration decay“ Messmethode

Nach dem einmaligen Einbringen einer bestimmten Menge an Tracer-Gas in den zu messenden Raum, wird der Konzentrationsverlauf in regelmäßigen Zeitabständen gemessen. Weiteres Tracer-Gas gelangt während der Messung nicht mehr in den Raum. Das bedeutet  $I(t)$  aus Gleichung (4.3.2) kann null gesetzt werden.

Ein oder mehrere Ventilatoren sorgen permanent für eine gute Durchmischung des Tracer-Gases mit der vorhandenen Raumluft. Finden Luftbewegungen in und aus dem Raum statt, wird der Konzentrationsverlauf des Tracer-Gases exponentiell fallen.

Es gilt :

$$Q_V(t) = \frac{-V \frac{dC}{dt}}{C(t)} \quad (4.3.1.1)$$

Durch Teilen von (4.3.1.1) durch  $V$ :

$$\frac{Q_V(t)}{V} = \frac{-\frac{dC}{dt}}{C(t)} \quad (4.3.1.2)$$

$\frac{Q_V(t)}{V}$  entspricht dem Luftwechsel  $n$  für den Messbereich mit dem Volumen  $V$ .

Gleichung (4.3.1.2) lässt sich somit schreiben:

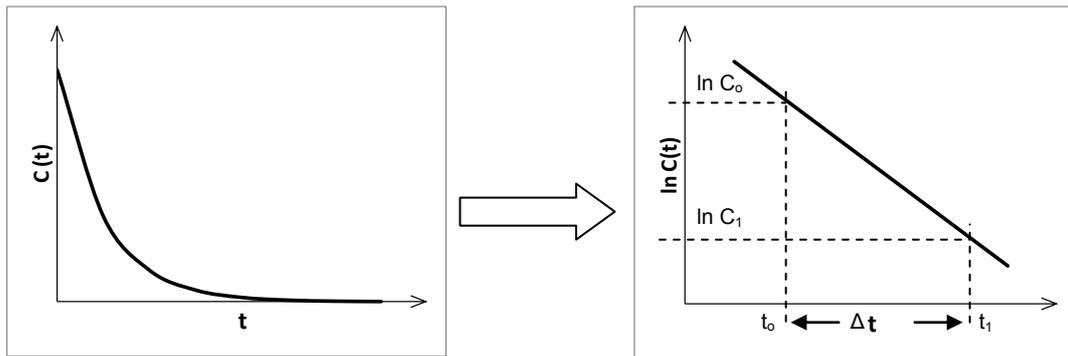
$$n * C(t) + \frac{dC}{dt} = 0 \quad (4.3.1.3)$$

Für die Lösung der Differenzialgleichung (4.3.1.3) gilt:

$$C = C_0 * e^{-n*t} \quad (4.3.1.4)$$

Mit:

$C_0 =$  Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt  $t_0$  z.B. in  $10^{-6}$ ppm  
 $n =$  Luftwechsel z.B. in  $\frac{1}{h}$



Löst man (4.3.1.4) nach  $n$  auf ergibt sich folgende Beziehung:

$$n = \frac{\ln C_0 - \ln C}{\Delta t} = \frac{\ln C_0 - \ln C_1}{t_0 - t_1} \quad (4.3.1.5)$$

Die Darstellung von  $\ln C$  über  $t$  muss eine fallende Gerade ergeben. Der Neigungswinkel entspricht dem Luftwechsel. Liefert die Auswertung keine Gerade, sind die Messergebnisse ungültig, da keine ausreichende Durchmischung des Tracer-Gas-Luft-Gemisches im Raum stattgefunden hat.

Ein entscheidender **Vorteil** der „concentration decay“ Messmethode ist, dass sie relativ einfach zu realisieren ist. Messergebnisse können innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit erzielt werden. Der Aufwand einer Messung ist relativ gering, da eine einzelne Messeinheit, das entsprechende Tracer-Gas und ein oder mehrere Luftdurchmischer (Ventilator) bereits ausreichen.

#### **4.3.2 Die „constant emission“ Messmethode**

Die „constant emission“ Methode ist interessant durchzuführen, wenn eine permanent vorhandene Luftbewegung über einen längeren Zeitraum gemessen werden soll, wie z.B. die Luftzirkulation durch ein Belüftungsrohr.

Bei der constant emission Messmethode wird Tracer-Gas in den zu untersuchenden Ort permanent injiziert und zwar so, dass die Konzentration  $C$  im Messraum konstant bleibt. Die eingebrachte Menge an Tracer-Gas wird dabei von einem Durchflussmengenmessgerät genau erfasst. Ventilatoren sorgen für eine gute Durchmischung des Gases.

Bei einem konstanten Luftvolumenstrom  $Q_V$  und einer konstanter Tracergasrate  $I$ , bleibt auch die Tracer-Gas Konzentration  $C$  konstant. Die Ableitung  $\frac{dC}{dt}$  wird zu null.

Gleichung (4.3.2) kann dann wie folgt geschrieben werden:

$$Q_V = \frac{I}{C} \quad (4.3.2.1)$$

Für den Luftwechsel  $n$  ergibt sich somit:

$$n = \frac{Q_V}{V} = \frac{I}{C * V} \quad (4.3.2.2)$$

Da bei dieser Messmethode Tracer-Gas permanent in den Messort strömt, können die Messungen aufgrund des Gasverbrauches mit hohen Kosten verbunden sein. Insbesondere ein schnelles und präzises Messgerät zur Bestimmung von  $I$  und  $C$  ist hier hilfreich, da man ein konstantes  $I(t)$  dosiert, wartet bis  $\frac{dC}{dt}$  null ist und andauernd  $C$  messen muss.

### **4.3.3 Die „constant concentration“ Messmethode**

Bei dieser Methode soll die Konzentration an Tracer-Gas im Messbereich konstant bleiben.

Luftbewegungen in oder aus dem Messbereich verursachen eine Veränderung der Tracer-Gas-Konzentration. Das Messsystem regelt die Tracer-Gas-Konzentration wieder auf einen konstanten, vorgegebenen Wert und misst dabei exakt die dafür notwendige injizierte Gasmenge (Gasmenge = Stellgröße).

$I(t)$  steht somit in einem proportionalen Verhältnis zum stattgefundenen Luftaustausch  $Q_V$ .

Die Ableitung  $\frac{dC}{dt}$  wird wieder null, so dass erneut wie bei Gleichung (4.3.2.1), gilt:

$$Q_V = \frac{I}{C} \quad \text{oder} \quad I = Q_V * C$$

Auch bei dieser Messmethode ist ein hoher Bedarf an Tracer-Gas erforderlich. Dies wird aber aufgewogen durch den Vorteil, dass eine Messung über mehrere Stunden oder Tage verlaufen kann. Dadurch kann nach der Messung ein sehr genaues Bild der stattgefundenen Luftbewegungen abgegeben werden. Wird zum Beispiel ein Gebäude vermessen, können unter anderem Lüftungsgewohnheiten der Hausbewohner genauestens nachvollzogen werden.

#### 4.3.4 Übersicht der Messmethoden

Die folgende Tabelle soll noch einmal die drei Messmethoden zusammenfassen:

Messmethode	möglicher Anwendungsfall	Zur Auswertung benutzte Gleichungen
<i>concentration decay</i>	Bestimmung der Luftwechselrate; Messen von Luftbewegungen in oder aus einem Raum innerhalb kurzer Zeit; Bestimmung der Lüftungseffizienz	$n = \frac{\ln C_0 - \ln C}{\Delta t}$
<i>constant emission</i>	Bestimmung der Luftwechselrate; Bestimmung des Luftstromes z.B. durch einen Ventilationsschacht.	$n = \frac{I}{C \cdot V}; Q_V = \frac{I}{C}$
<i>constant concentration</i>	Bestimmung der Luftwechselrate; Messung von Luftbewegungen über einen langen Zeitraum z.B. in Wohnungen; Messung des Luftaustausches.	$n = \frac{I}{C \cdot V}; Q_V = \frac{I}{C}$

## 5. Literaturverzeichnis

Herbert Zierhut	Sanitär-Heizung-Klima: Anlagemechaniker/-in Lernfelder 1-15; 3. Auflage 2011
Herbert Zierhut	Installations- und Heizungstechnik; 4. Auflage
Innova AirTech Instruments	Ventilation Measurements and other Tracer- Gas Applications
Innova AirTech Instruments	Thermal Comfort
Claude-Alain Roulet	Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments; 2e édition mise à jour et complétée; 2008-2010
Ihle-Bader-Golla	Tabellenbuch Sanitär Heizung Klima/Lüftung Anlagentechnik SHK Ausbildung und Praxis Netzmeister/-monteure; 8. Auflage 2011
	<a href="http://www.ltm-ulm.de">www.ltm-ulm.de</a>
	<a href="http://www.lumasenseinc.com">www.lumasenseinc.com</a>
Alexander Merzkirch	Database, Details and best-available techniques for Energy Efficiency in residential buildings in Luxemburg (DDEELUX); 2. Interim Report, April 2012
Ernst Rudolf Schrameck	Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; 74. Auflage 2008
Sandberg, Sjöberg	The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms. Building and Environment. 1983

# 6

# Tracer-Gas-Messverfahren

---

Versuchsdurchführung

**Inhalt:**

- Erklärungen und Durchführung einer Messung nach der „constant-emission“ Messmethode (*Erster Laborversuch*)
- Erklärungen und Durchführung einer Messung nach der „constant-concentration“ Messmethode (*Zweiter Laborversuch*)
- Erklärungen und Durchführung einer Messung nach der „concentration decay“ Messmethode (*Dritter Laborversuch*)

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Erster Laborversuch: Die „constant emission“ Messmethode.....	152
1.1 Funktionsweise einer zentralen Lüftungsanlage .....	152
1.2 Verlauf der Messungen .....	154
1.2.1 Messung 1: Bestimmung der internen Leckage.....	154
1.2.2 Messung 2: Bestimmung des Luftvolumenstromes im Abluftkanal.....	155
1.3 Beispiel einer Messung nach der „constant emission“ Messmethode.....	157
1.4 Anmerkung.....	159
2. Zweiter Laborversuch: die „constant concentration“ Messmethode.....	160
2.1 Verlauf der Messung .....	160
2.2 Messtechniken bei Luftwechselfmessungen in Einzelräumen .....	160
2.3 Beispiel einer Messung mit der „constant concentration“ Messmethode ..	162
3. Dritter Laborversuch: die „concentration decay“ Messmethode.....	164
3.1 Verlauf der Messung .....	164
3.2 Luftführung, Luftwechselrate und Luftaustauschwirkungsgrad .....	164
3.3 Hinweise zur Auswertung der Messergebnisse.....	167
3.4 Beispiel einer Messung mit der „constant decay“ Messmethode .....	169

## **1. Erster Laborversuch: Die „constant emission“ Messmethode**

In diesem Laborversuch soll eine Tracer-Gas-Messung an einer zentralen Lüftungsanlage durchgeführt werden, die die Universität für Versuchszwecke besitzt.

Die Tracer-Gas-Messung eignet sich besonders gut für diese Art von Messung. Sie führt zu besseren Ergebnissen als es bei Luftgeschwindigkeitsmessungen mit typischen Anemometern der Fall ist. Durch Rohrbiegungen, Rohrverengungen usw. entstehen Turbulenzen. Die Luftgeschwindigkeit wird lokal stark beeinflusst. Dem Tracer-Gas-Verfahren kommen, im Gegensatz zu anderen Messsystemen, genau diese Einflüsse zu Gute, da insbesondere die Turbulenzen für eine gute Durchmischung der Luft mit dem Tracergas sorgen.

### **1.1 Funktionsweise einer zentralen Lüftungsanlage**

Außerhalb des Gebäudes wird Außenluft angesaugt. Diese Frischluft wird optional durch einen Luft- oder Sole-Erdwärmeübertrager vorerwärmt und zur Lüftungsanlage geführt. Im Wärmetauscher nimmt die gefilterte Außenluft einen großen Teil der Wärmeenergie der verbrauchten Abluft auf, bevor sie über das Luftverteilsystem in die einzelnen Räume eingebracht wird. In den Ablufträumen wie Badezimmer, WC, Küche oder Hauswirtschaftsraum wird die verbrauchte Luft abgeführt und über ein separates Kanalsystem wieder zurück zum Gerät transportiert. Dort gibt sie im Wärmetauscher ihre Wärmeenergie an die Zuluft ab, bevor sie dann deutlich abgekühlt das Gebäude verlässt. Über einen Bypass kann der Wärmeübertrager im Sommer umgangen werden, um Druckverluste zu vermeiden, wenn wenig oder keine thermischen Energiegewinne in der Abluft enthalten sind.

*Abbildung 1.1.1* stellt den schematischen Aufbau eines Lüftungssystems dar. Die Pfeile geben die Richtungen der Luftströmungen an. (Vgl.: <http://www.ltm-ulm.de>)

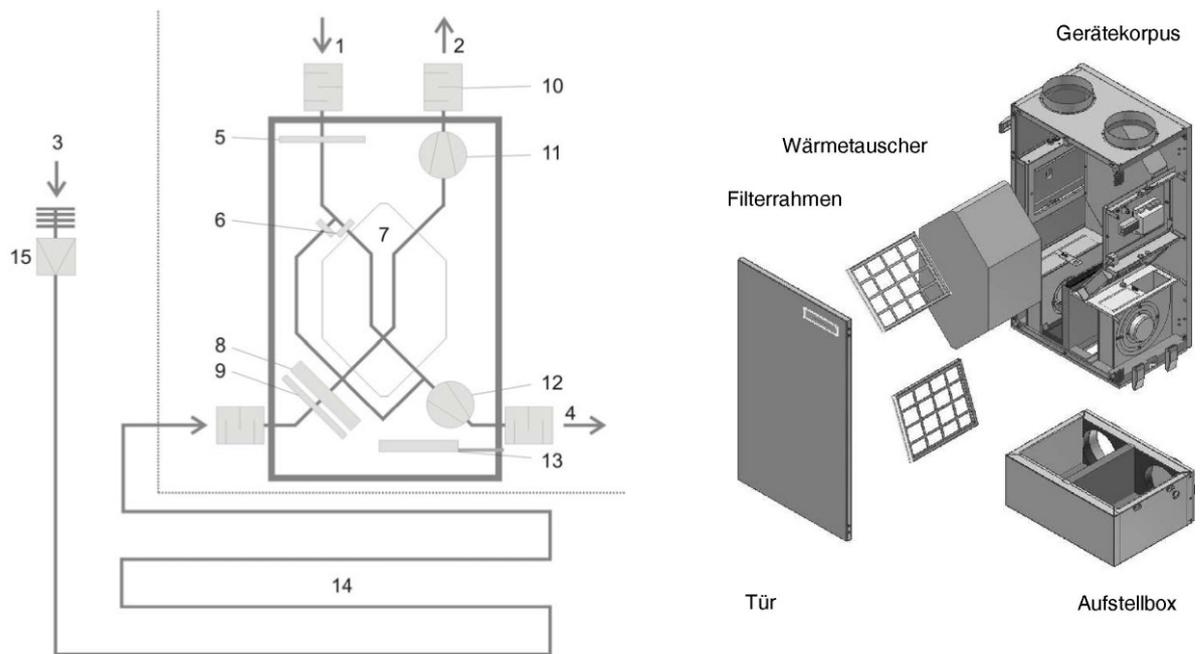


Abbildung 1.1.1:  
 Lüftungsanlage und schematischer  
 Aufbau des Lüftungssystems  
 (Quelle: <http://www.ltm-ulm.de>)

<b>Anlagenkomponenten (Abb. 1.1.1):</b>	
1. <b>Abluft:</b> Verbrauchte warme Luft wird aus der Wohnung abgesaugt.	2. <b>Zuluft:</b> Frische warme Luft strömt in die Wohnung.
3. <b>Außenluft:</b> Frische Luft wird aus dem Freien angesaugt, a. über einen Erdreichwärmeübertrager (EWT), b. direkt	4. <b>Fortluft:</b> Verbrauchte und abgekühlte Luft wird ins Freie abgeführt.
5. Abluftfilter	6. Bypass
7. Aluminiumplatten - Wärmeübertrager	8. Feinfilter
9. Außenluftfilter	10. Rohrschalldämpfer
11. Zuluftventilator	12. Fortluftventilator
13. Kondensatabfluss	14. Erdreichwärmeübertrager (optional)
15. EWT Filter	16. Bypass Erdreichwärmeübertrager oder direkt (optional)

## 1.2 Verlauf der Messungen

### 1.2.1 Messung 1: Bestimmung der internen Leakage

Bei der Lüftungsanlage ist es wichtig, dass sich **Fortluft** nicht wieder mit frischer **Außenluft** vermischt und dadurch verunreinigt wird. Dies kann bei einer falschen Positionierung der Lüftungsaus- und Lüftungseingänge der Fall sein (externe Leckagen) oder durch interne Undichtigkeiten (interne Leckagen) in der Lüftungsanlage selbst.

Zur Bestimmung der internen und externen Leckagen  $r_{SI}$  bzw.  $r_{SO}$  dient folgender Versuchsaufbau:

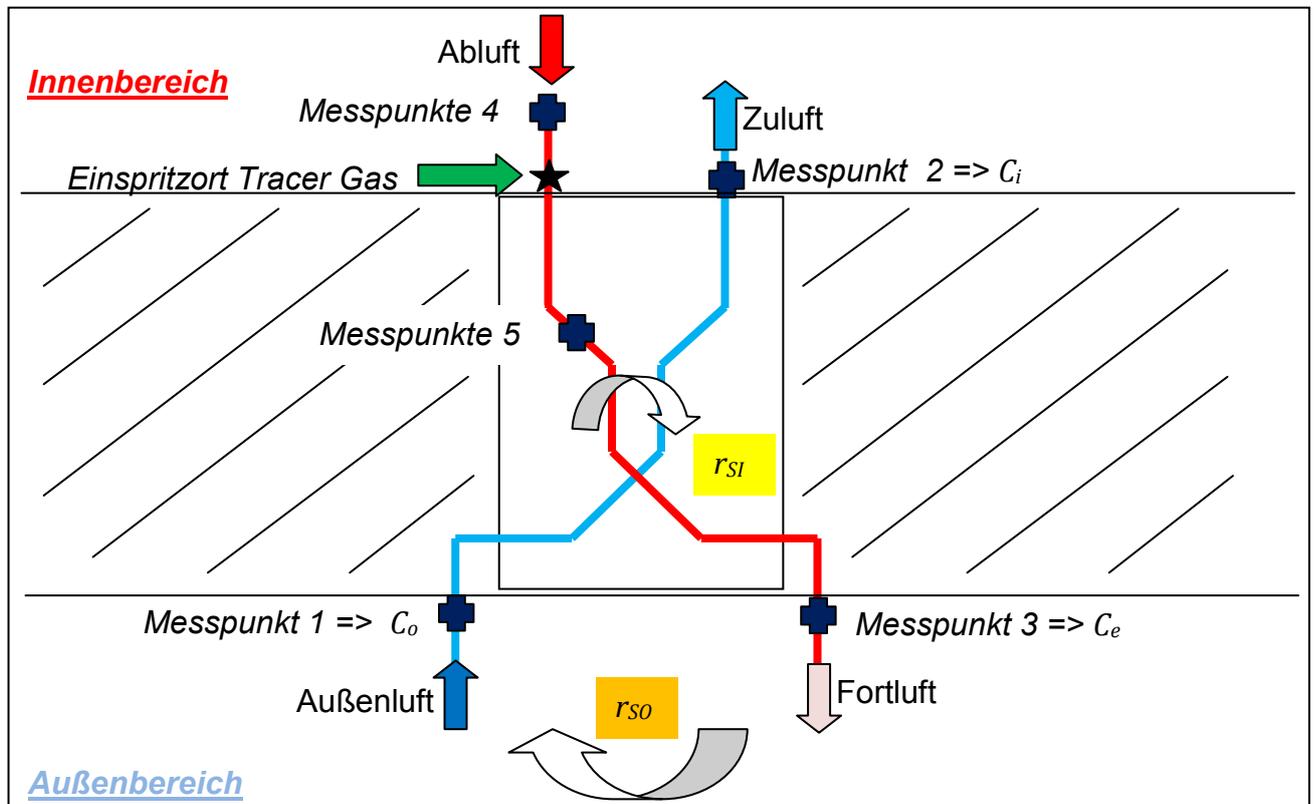


Abbildung 1.2.1.1:

Bestimmung der internen und externen Leckagen an einer zentralen Lüftungseinheit.

Während der Messung werden an drei unterschiedlichen Messpunkten die Konzentrationen ermittelt:

$C_o$  Luftzufuhr (Außenluft) Messpunkt 1;

$C_i$  Zuluft (Innenbereich) Messpunkt 2;

$C_e$  Fortluft (Außenbereich) Messpunkt 3.

Das Messgerät liefert die Messergebnisse in Form von Exceltabellen, so dass daraus gemittelte Konzentrationswerte bestimmt werden können.

⇒ Der Vergleich der gemittelten Konzentrationen  $C_e$  und  $C_o$  gibt Aufschluss über die Leckage  $r_{SO}$  zwischen angesaugter **Außenluft** und abgeführter **Fortluft** im Außenbereich:

$$r_{SO}(\text{in } \%) = \frac{C_o}{C_e} * 100$$

⇒ Das Verhältnis der Konzentrationen  $C_i$  und  $C_e$  liefert die Leckage der verbrauchten **Fortluft** in die **Zuluft** des Raumes  $r_{ST} = \frac{C_i}{C_e}$ .

⇒ Durch Bildung der Differenz  $r_{ST} - r_{SO}$  kann die *interne Leckage*  $r_{SI}$  berechnet werden:

$$r_{SI} = r_{ST} - r_{SO}$$

$$r_{SI}(\%) = \left( \frac{C_i}{C_e} - \frac{C_o}{C_e} \right) * 100$$

### **1.2.2 Messung 2: Bestimmung des Luftvolumenstromes im Abluftkanal**

Für diese Messung wird der Versuchsaufbau aus Messung 1 (*Kapitel 1.2.1*) übernommen.

Das Tracer Gas wird nach wie vor in die Abluftöffnung eingebracht, gleichzeitig muss aber jetzt auch eine Konzentrationsmessung in der Abluftöffnung vor und nach dem Einspritzort des Tracer-Gases erfolgen (Messpunkte 4 und 5).

Damit das Ergebnis der Konzentrationsmessung nach dem Einspritzort aussagekräftig ist, darf der Probenentnahmepunkt nicht zu nahe am Injektionspunkt liegen, nur dann ist eine ausreichende Durchmischung von Tracer-Gas mit der angesaugten Luft sichergestellt.

**Anmerkung:** In der Literatur finden sich unterschiedliche Faustregeln bezüglich des minimal zu wählenden Abstandes:

- Bei einer gerade Rohrführung empfiehlt der Gerätehersteller „Innova“ einen Abstand von 25mal dem Rohrdurchmesser (vgl. *InnovaAirTechInstruments, 1997*)
- Anderorts findet man bei gerader Rohrführung einen Abstand von 10mal den Rohrdurchmesser.
- Ein Abstand von 5mal dem Rohrdurchmesser ist ausreichend, wenn sich zwischen Probenentnahmeort und Tracer-Gas-Einbringung ein Durchmischer (Venilator) oder mehrere Rohrbiegungen befinden.

(vgl. *Claude-Alain Roulet, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments; 2008*)

Auch bei dieser Messung liefert das Messgerät die Konzentrationswerte in Form von Exceltabellen. Während der Messung und bei der Auswertung muss darauf geachtet werden, dass das System einige Zeit braucht bevor ein stationärer Zustand erreicht wird. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache müssen auch die aufgenommenen Messpunkte für die Auswertung ausgewählt werden.

Anhand der gemessenen Konzentrationen und zusammen mit der bekannten Injektionsrate, liefert das Messgerät sofort den Luftvolumenstrom  $Q_V$  im Abluftkanal. Er kann aber auch unter Zuhilfenahme von Gleichung (4.3.2.1 Kapitel 5) wie folgt berechnet werden:

$$Q_V = \frac{I}{C_5 - C_4} \quad (1.2.2.1)$$

Wobei:  $I$  = injiziertes Tracer gas z.B. in  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$Q_V$  = Luftvolumenstrom in  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$C_4$  = Tracergaskonzentration vor dem Einspritzort z.B. in  $10^{-6}ppm$

$C_5$  = Tracergaskonzentration nach dem Einspritzort z.B. in  $10^{-6}ppm$

Die an den unterschiedlichen Messpunkten erzielten Konzentrationsanteile an Tracer-Gas können graphisch dargestellt werden, wie *Abbildung 1.2.2.1* beispielhaft zeigt.

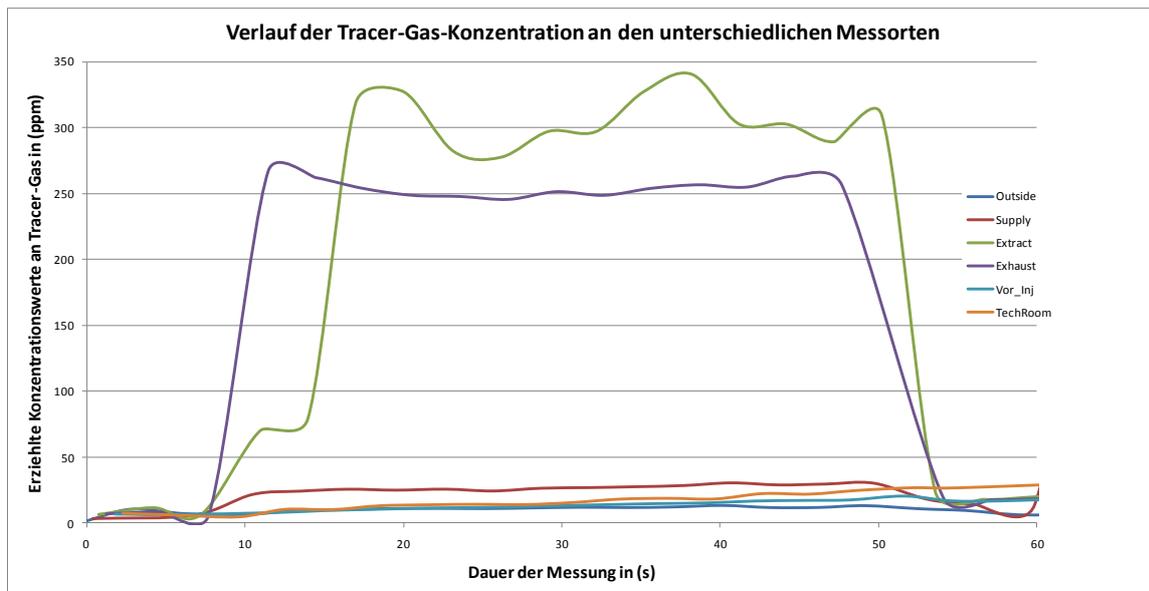


Abbildung 1.2.2.1: Beispiel einer graphischen Darstellung der Messergebnisse

### 1.3 Beispiel einer Messung nach der „constant emission“ Messmethode

Abbildung 1.3.1 zeigt den Verlauf der R134a Tracergaskonzentration in  $\frac{mg}{m^3}$  in Abhängigkeit der Messzeit, gemessen im Außenluftversorgungsrohr einer Belüftungsanlage (Messpunkt 1).

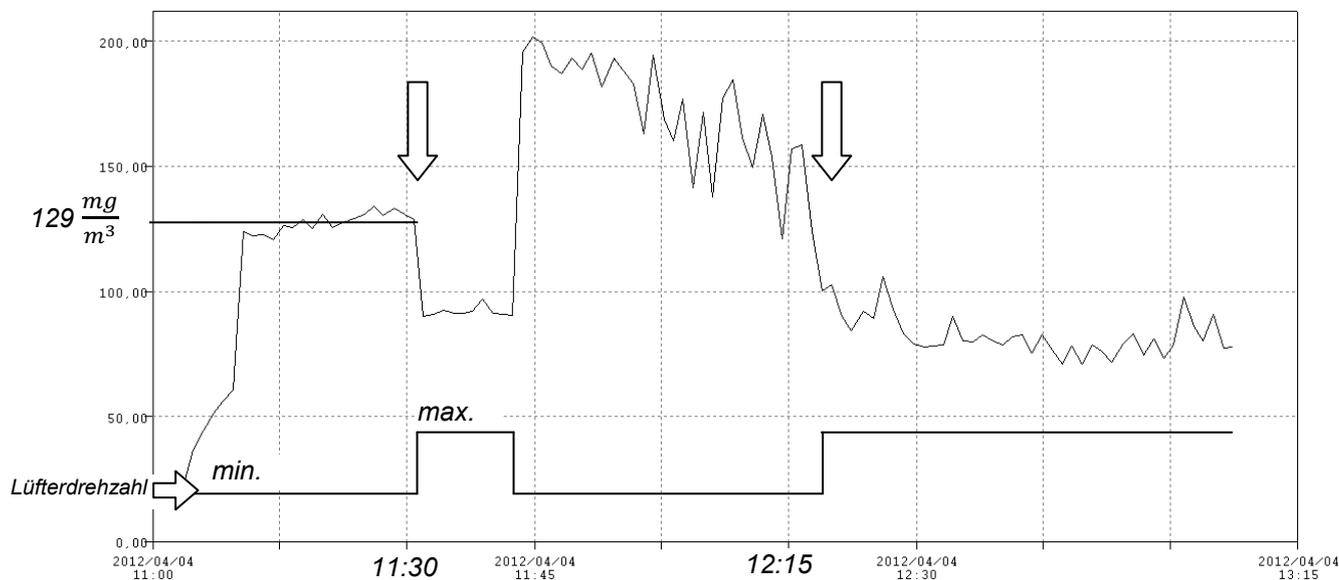


Abbildung 1.3.1: Messergebnis einer älteren Tracergas-Messung

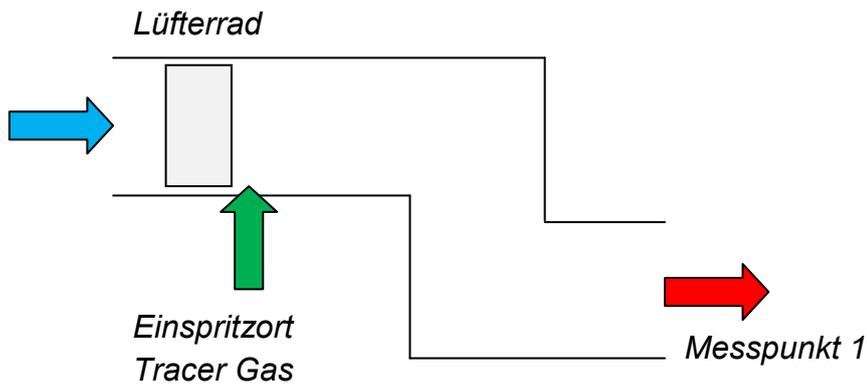


Abbildung 1.3.2: Schematische Darstellung der Messsituation

Es wurden 3 ml/s an Tracer-Gas, sofort nach dem Lüfterrad eingebracht. Der Messpunkt befand sich zwei Meter stromabwärts hinter dem Injektionsort. Zwischen ihm und dem Injektionspunkt waren insgesamt zwei 90° Rohrbiegungen. Sie sorgten für eine ausreichende Durchmischung der Luft mit dem Tracer-Gas.

Die Auswertung des Messergebnisses (Abbildung 1.3.1) zeigt, dass gegen 11:30 ein sprunghafter Abfall der gemessenen Konzentration erkennbar ist. Hier wurde die Lüfterdrehzahl maximal erhöht. Gegen 11:42 wurde die Lüfterdrehzahl wieder auf minimal zurückgestellt. Um etwa 12:19 erfolgte wieder eine Erhöhung der Lüfterdrehzahl auf ihren maximalen Wert.

Die gemessenen Konzentrationswerte sind, trotz gleicher Lüfterdrehzahl, nach 12:19 leicht tiefer als dies zwischen 11:30 und 11:42 der Fall war. Dieser Unterschied kann durch veränderte Randbedingungen während der Messung erklärt werden, da nicht darauf geachtet werden konnte, ob die Türen im Raum nicht während der Messung geöffnet wurden.

Es soll beispielhaft der Luftvolumenstrom zwischen 11:00 und 11:30 berechnet werden:

=> Die Messung ergab eine gemittelte Tracergaskonzentration von  $129 \frac{mg}{m^3}$  (vgl. Abbildung 1.3.1).

**Wichtig:** Das Messgerät liefert die Messwerte in  $\frac{mg}{m^3}$ , nicht in ppm!

Die Tracergaseinspritzrate  $I$  betrug  $3 \frac{ml}{s}$ .

Unter Berücksichtigung der Tracergasdichte von  $4,278 \frac{kg}{m^3}$  bei  $20^\circ C$  Lufttemperatur und 1bar Luftdruck (Vgl.: [www.peacesoftware.de/einigewerte/calc\\_r134a.php5](http://www.peacesoftware.de/einigewerte/calc_r134a.php5)) kann die Einspritzrate in  $\frac{mg}{s}$  umgerechnet werden:

$$\begin{aligned} I &= \dot{m} = \rho * \dot{V} \\ I &= 4,278 \frac{kg}{m^3} * 3 \frac{ml}{s} \\ I &= 12,834 \frac{mg}{s} \end{aligned}$$

=> Der Luftvolumenstrom wird mit der Gleichung (4.3.2.1 Kapitel 5) berechnet:

$$\begin{aligned} Q_V &= \frac{I}{c} \\ Q_V &= \frac{12,836 * 3600 \frac{mg}{h}}{129 \frac{mg}{m^3}} \\ Q_V &= 360 \frac{m^3}{h} \end{aligned}$$

#### 1.4 Anmerkung

Der stündliche Volumenstrom in einem Luftkanal hängt von dem Querschnitt und der Luftgeschwindigkeit ab. Bei kleineren bis mittleren Volumenströmen werden Anlagen mit Luftgeschwindigkeiten in den Hauptkanälen bis maximal 8 m/s bevorzugt. In Lüftungs- und Klimageräten liegen sie zwischen 2 m/s und 3 m/s. Zu hohe Luftgeschwindigkeiten verursachen Strömungsgeräusche und hohe Druck- bzw. Energieverluste.

Eine Belüftungsanlage kann durchaus mit einer Heizungsanlage verglichen werden. Ähnlich wie in den Heizungsrohren entstehen auch in den Luftkanälen Druckverluste. Für die Berechnung der Druckverluste in einem Kanalnetz gelten im Wesentlichen die gleichen Formeln wie für eine Rohrnetzberechnung einer Heizungsanlage.

## 2. Zweiter Laborversuch: die „constant concentration“ Messmethode

In diesem zweiten Laborversuch wird der Aufbau und der Messbeginn einer Luftwechselfmessung nach der „constant concentration“ Messmethode gezeigt.

### 2.1 Verlauf der Messung

Die Tracer-Gas-Konzentration wird in einem Raum der Universität während der Messung konstant auf einen Wert von 8ppm geregelt. Ein Ventilator sorgt für die Durchmischung der Umgebungsluft mit dem Tracer-Gas.

Anmerkung: Diese Art der Messung führt nur zu sinnvollen Messergebnissen, wenn sie über einen längeren Zeitraum andauert. Die während des Laborversuches vorgeführte Messung beschränkt sich aus Zeitgründen auf die Aufnahme der ersten Messpunkte der Messserie.

### 2.2 Messtechniken bei Luftwechselfmessungen in Einzelräumen

Bei Luftwechselfmessungen in Einzelräumen muss man unterscheiden, ob der Luftwechsel exklusiv mit der Außenumgebung erfolgt oder ob zusätzlich z.B. ein Luftaustausch mit angrenzenden Räumen stattfindet. Letzteres kann der Fall sein, wenn Räume durch undichte Türen miteinander verbunden sind. Diese Tatsache kann zu Fehlinterpretation der Messergebnisse führen.

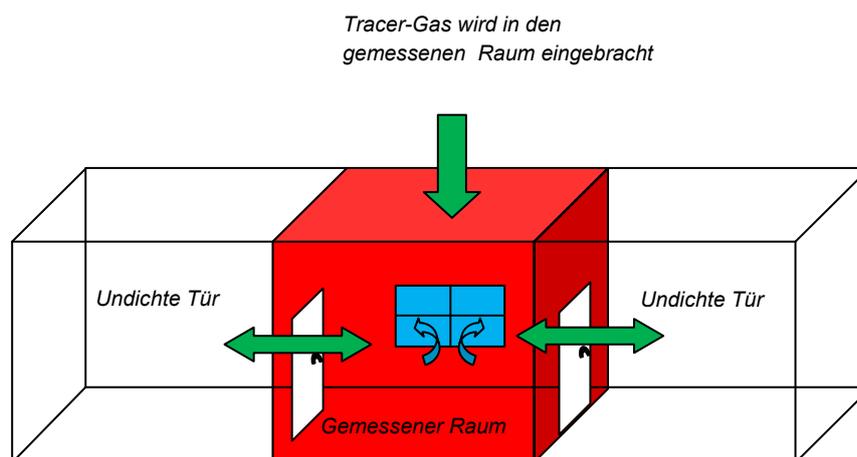
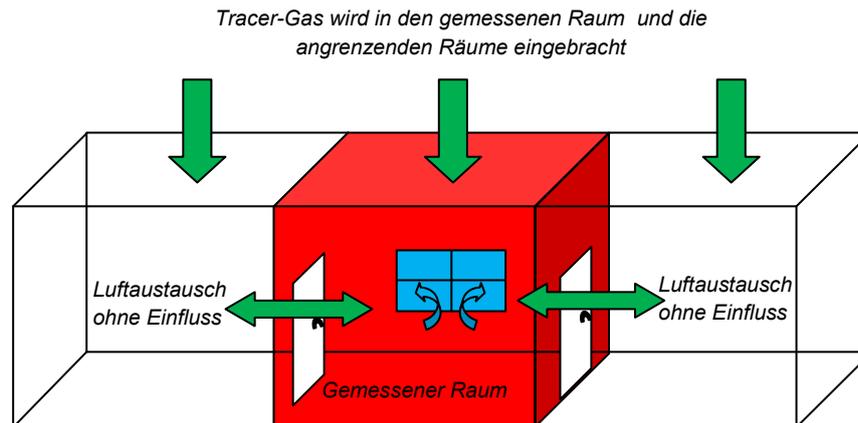


Abbildung 2.2.1: Luftwechsel mit der Außenumgebung und mit angrenzenden Räumen.

Durch einen angepassten Messaufbau kann der Einfluss von Undichtheiten zu null gesetzt werden. Dies lässt sich dadurch erreichen, dass in den angrenzenden Räumen ebenfalls Tracer-Gas injiziert wird und auch dort die Tracergas-Konzentration auf den gleichen Wert konstant gehalten wird. Es muss darauf geachtet werden, dass sich während der Messung die Randbedingungen nicht verändern: z.B. dass kein Öffnen von Türen oder Fenstern stattfindet.



*Abbildung 2.2.2: Messung des Luftwechsels mit der Außenumgebung*

Erfolgt ein Luftaustausch zwischen den Räumen, führt dies nicht zu einer Erhöhung des Tracer-Gas-Ausstoßes im gemessenen Raum. Es wird durch diesen Messaufbau sicher nur der Luftwechsel mit dem Außenbereich erfasst.

Für einige Untersuchungen will man sowohl den Luftaustausch mit dem Außenbereich als auch den Luftaustausch mit dem angrenzenden Raum genau quantifizieren.

In dem Fall muss während einer ersten Messserie die Tracer-Gas-Konzentration in einem der beiden Räume (z.B. Raum 1) konstant gehalten werden. Im zweiten Raum (Raum 2) wird die Tracer-Gas-Konzentration gemessen.

In einer zweiten Messserie werden die Räume getauscht. In Raum 1 erfolgt jetzt die Tracer-Gas-Konzentrationsmessung, während nun in Raum 2 die Konzentration konstant gehalten wird.

Das Aufstellen der Gesamtbilanz liefert den inneren Luftwechsel sowie den Luftaustausch jeden Raumes mit dem Außenbereich. Um die Resultate vergleichen zu können, ist es wichtig, dass die Randbedingungen von einer Messserie zur anderen nicht verändert werden.

Eine Möglichkeit die Messzeit zu verkürzen, ist das Verwenden von unterschiedlichen Tracergas-Sorten. In dem Fall kann man direkt, mit nur einer Messserie, zu den gleichen Informationen gelangen.

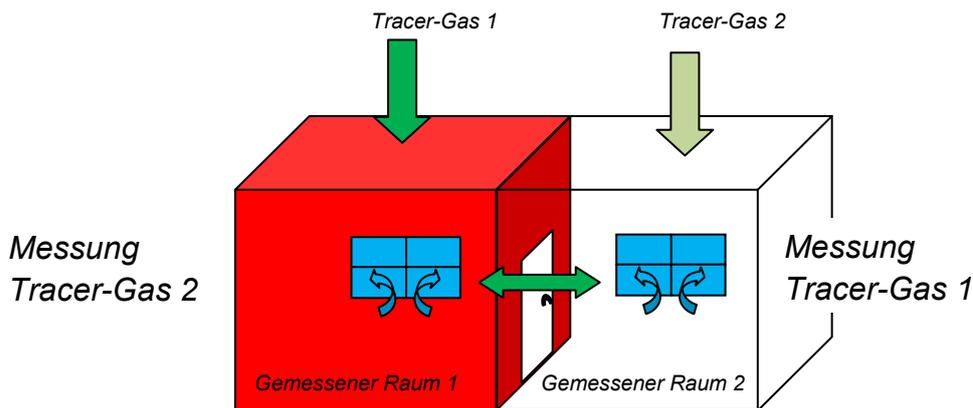


Abbildung 2.2.3: Luftwechsellmessung mit zwei unterschiedlichen Tracer-Gasen

### 2.3 Beispiel einer Messung mit der „constant concentration“ Messmethode

Bei diesem Beispiel wurde der Luftwechsel für einen kleinen Büroraum an der UNI-Luxemburg ermittelt. Türen und Fenster blieben während der Messung geschlossen. Im Raum wurde bewusst nicht geheizt. Der Tracer-Gas-Anteil wurde versucht im Raum konstant auf 10ppm zu halten. Das Messsystem erfasste die dafür notwendige Menge an Tracer-Gas. Diese Menge steht in einem direkten Verhältnis zum Luftwechsel.

Der Luftwechsel  $n$  wird vom Messsystem geliefert (Abbildung 2.3.2). Rechnerisch wird  $n$  nach Gleichung (4.3.2.2 Kapitel5) berechnet:

$$n = \frac{I}{C * V}$$

Das Volumen  $V$  des Raumes wurde zuvor ermittelt und  $C = 10\text{ppm} = 10^{-5}$ . In Abbildung 2.3.2 ist zu erkennen, dass  $n$  ab 14:00h etwa zwischen 0,15 und  $0,25 \frac{1}{h}$  variiert.

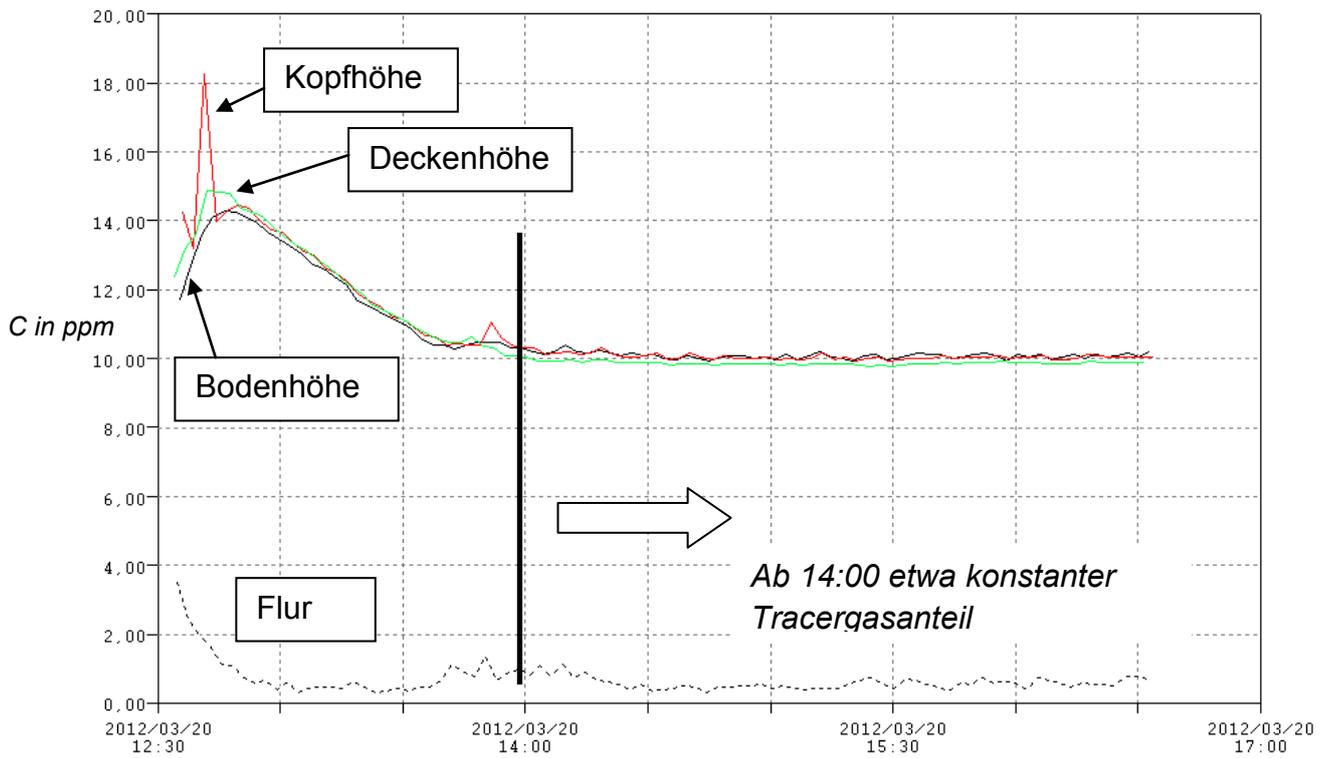


Abbildung 2.3.1: Ergebnis einer Luftwechselfmessung an der Universität-Luxemburg

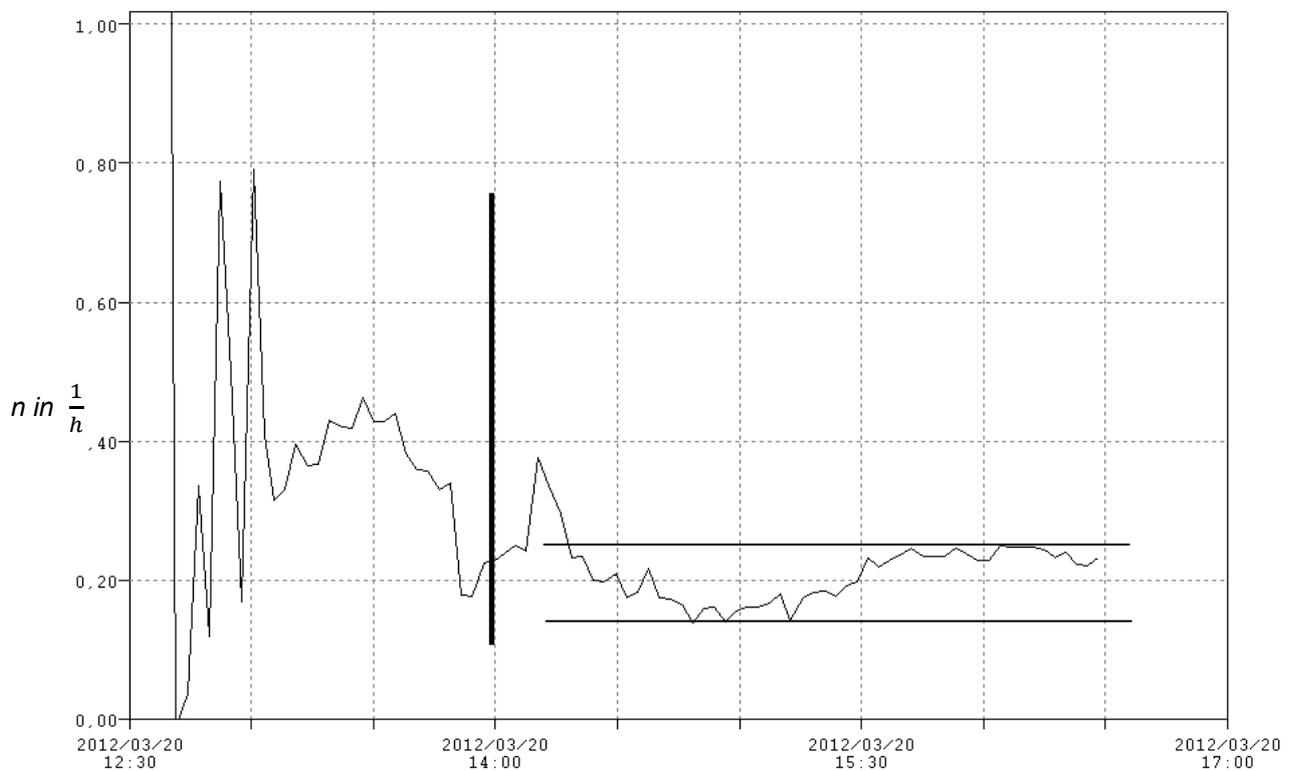


Abbildung 2.3.2: Ermittelter Luftwechsel

### **3. Dritter Laborversuch: die „concentration-decay“ Messmethode**

Schwerpunkt dieses Laborversuches ist das Vorführen einer Messung nach der „concentration decay“ Messmethode.

#### **3.1 Verlauf der Messung**

Die Messung soll zeigen, wie der Luftaustauschwirkungsgrad einer Lüftungsanlage bestimmt werden kann.

Tracer-Gas wird in den Versuchsraum so lange eingebracht, bis ein konstanter Konzentrationswert gemessen werden kann. Ein Ventilator sorgt für das Durchmischen des Tracer-Gases mit der Umgebungsluft. Anschließend wird die Tracergaseinspritzung gestoppt und in regelmäßigen Abständen beginnen die Konzentrationsmessung zur Ermittlung des Luftaustauschwirkungsgrades.

Da im Gebäude der Universität kein Raum zur Verfügung steht, der eine mechanische Lüftung mit definierten Ein- und Auslassöffnungen besitzt, werden Tracer-Gas-Konzentrationsmessungen an zwei beliebigen Stellen in einem Raum durchgeführt. Die gemessenen Konzentrationswerte werden in einer Abklingkurve aufgetragen. Anhand der Kurve wird anschließend die Berechnung eines Luftaustauschwirkungsgrades simuliert.

#### **3.2 Luftführung, Luftwechselrate und Luftaustauschwirkungsgrad**

Die concentration-decay Messmethode wird häufig angewendet, um in einem Raum Luftführung und Luftwechselrate an unterschiedlichen Stellen zu bestimmen und um daraus eine Aussage über die Lüftungseffizienz zu ermöglichen.

Die von der Lüftungsanlage gelieferte Luft, soll möglichst zugfrei in einen Raum ein- und wieder ausströmen. Dabei ist darauf zu achten, dass alle Zonen des Raumes möglichst gleichmäßig durchlüftet werden. Einfluss auf die Raumdurchlüftung haben unter anderem *Lufttemperatur* und *Luftführung*:

- Die Lufttemperatur beeinflusst die Dichte der Luft. Gekühlte Luft im Sommer ist schwerer als die Raumluft und hat deshalb die Tendenz, nach unten zu sinken. Im Winter, wenn die Zuluft wärmer als die Raumluft ist, steigt sie nach oben.

(Quelle: Herbert Zierhut, *Installations- und Heizungstechnik*; Seite 563)

- Die Luftführung wird durch räumliche und bauliche Maßnahmen bestimmt, wie zum Beispiel Positionierung von Ein- und Auslassöffnung. In der Theorie kann zwischen Extremfällen von Raumströmungsformen unterschieden werden:

- Ideale Verdrängungsströmung  
(Kolbenhubartige Luftbewegung)
- vollständige Durchmischung  
(Rückvermischung, Luftbewegung mit innerer Rückführung)
- Luftführung mit Tot-Zonen ohne Durchmischung  
(Kurzschlussströmung)

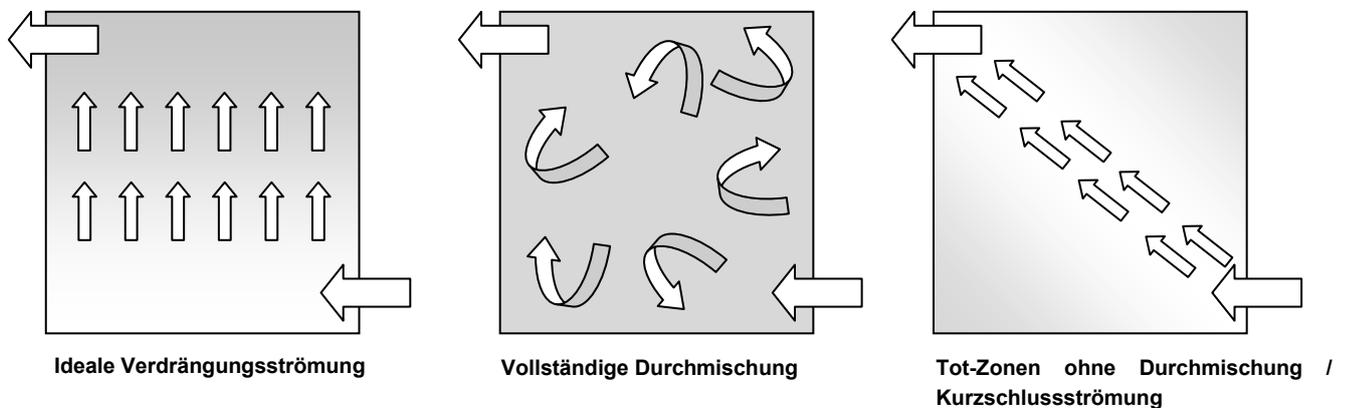


Abbildung 3.2.1: Extremfälle von Raumströmungsformen

Welche Luftbewegung durch die Lüftungsanlage im Raum tatsächlich herrscht und welche vorzuziehen ist, hängt von vielen Faktoren ab. Eine Verdrängungsströmung mit einer Positionierung der Einlassöffnung in Fußhöhe und einer Positionierung der Auslassöffnung über Kopf kann zwar für einen optimalen Luftaustausch sorgen, gleichzeitig aber nur begrenzt zum Wohlfühlgefühl der Menschen im Raum beitragen.

Die Wirksamkeit der Lüftung wird an ihrer Fähigkeit gemessen „alte“ Raumluft durch „frische“ Außenluft zu ersetzen und Schadstoffe abzuführen. Die Gütegrade für Austausch der Luft und Schadstoffabfuhr hängen im Wesentlichen von der **Verweilzeit** der Luft und der Verweilzeit der Schadstoffe im Raum ab.

(vgl.: Ernst Rudolf Schrameck, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; S1471)

Die kürzeste, durchschnittliche Verweilzeit der Luft im Raum wird mit nominaler Zeitkonstante  $\tau_n$  bezeichnet.

Es gilt: 
$$\tau_n = \frac{1}{n} \quad (3.2.1)$$

$$n = \text{Luftwechsel in z. B. } \frac{1}{h}$$

Die reelle durchschnittliche Verweilzeit der Luft im Raum wird hier mit  $\tau_{rv}$  bezeichnet.

Das Verhältnis nominale Zeitkonstante  $\tau_n$  zu reeller durchschnittlicher Verweilzeit wird als **Luftaustauschwirkungsgrad** (= *Lüftungseffizienz*) definiert:

$$\eta = \frac{\tau_n}{\tau_{rv}} \in [0; 1] \quad (3.2.2)$$

Anmerkung: Für eine ideale Verdrängungsströmung wird der komplette Austausch der Raumlufte mit der kürzesten reellen durchschnittlichen Verweilzeit erreicht;  $\eta = 1$ . Bei vollständiger Durchmischung ist die tatsächliche durchschnittliche Verweilzeit doppelt so lang;  $\eta = 0,5$ . Bei Kurzschlussströmung erhöht sich die tatsächliche durchschnittliche Verweilzeit, so dass sie ein Vielfaches der nominalen Zeitkonstanten beträgt;  $\eta \approx 0$ .

Der mit der reellen durchschnittlichen Verweilzeit definierte Luftaustauschwirkungsgrad  $\eta$  sagt nur etwas über die Strömungsform des Gesamtlufthaushaltes des Raumes aus, nicht aber speziell etwas über den Aufenthaltsort der Luft, sowie dessen „Alter“. Aussagen darüber ergeben nur Messungen von lokalen Werten.

Das **Alter der Luft** bezeichnet die Zeit zwischen dem Eintritt der Luft in den Raum und der Ankunft der Luft an einem bestimmten Punkt. Je jünger die Luft ist, desto frischer ist sie, da ihr noch nicht so viele Schadstoffe beigemischt sind.

Es wird nach Sandberg angenommen, dass das durchschnittliche Alter der Luft ( $\tau_{air-room-mean}$ ), gemessen an irgendeiner Stelle im Raum, immer der Hälfte der reellen durchschnittlichen Verweilzeit der Luft entspricht:

$$\tau_{air-room-mean} = 0.5 * \tau_{rv} \quad (3.2.3)$$

Genauso entspricht das durchschnittliche Alter der Luft, gemessen an der Raumlufte-Auslassöffnung, der kürzesten, durchschnittlichen Verweilzeit der Luft im Raum  $\tau_n$ :

$$\tau_{air-exhaust-mean} = \tau_n \quad (3.2.4)$$

Der Luftaustauschwirkungsgrad  $\eta$  kann nun unter Benutzen der Formeln (3.2.3 und 4) folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\eta = \frac{\tau_{air-exhaust-mean}}{2 * \tau_{air-room-mean}} \quad (3.2.5)$$

Eine Tracergas-Konzentrationsmessung im Raum und an der Raumlufte-Auslassöffnung erlaubt es beide Verweilzeiten zu bestimmen, so dass mit Gleichung (3.2.5) die Lüftungseffizienz berechnet werden kann.

### 3.3 Hinweise zur Auswertung der Messergebnisse

Wird die Tracer-Gas-Konzentration gemessen an der Raumlufte-Auslassöffnung als Funktion der Zeit aufgetragen, so erhält man beispielhaft einen in *Abbildung 3.3.1* dargestellten Kurvenverlauf. Die eigentliche Abklingkurve beginnt ab dem Zeitpunkt  $t = t_1$ .

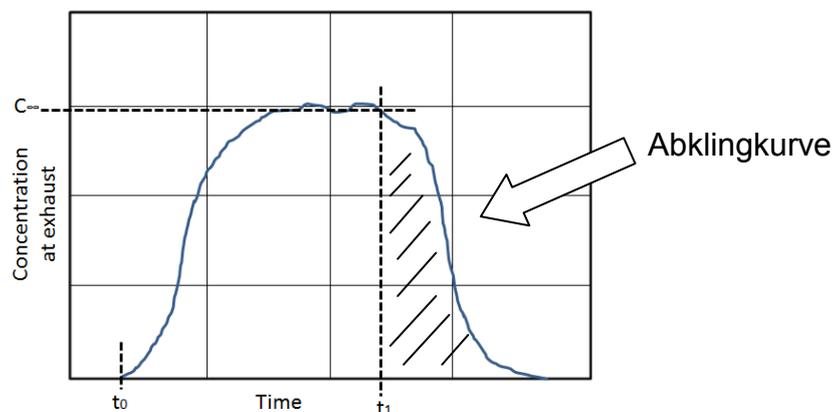


Abbildung 3.3.1: Konzentrationsverlauf in Abhängigkeit der Messzeit

Das durchschnittliche Alter der Luft an der Auslassöffnung wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\tau_{air-exhaust-mean} = \int_{t_1}^{\infty} C_{exhaust}(t) dt \quad (3.3.1)$$

Das durchschnittliche Alter der gesamten Raumluff kann mit den Konzentrationswerten, gemessen an der Auslassöffnung, bestimmt werden durch das Benutzen der Gleichung (3.3.2): (vgl. *Innova AirTech Instruments: Ventilation Measurements and other Tracer-Gas Applications; Seite 29*)

$$\tau_{air-room-mean} = \frac{\int_{t_1}^{\infty} t * C_{exhaust}(t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} C_{exhaust}(t) dt} \quad (3.3.2)$$

Mit Gleichung (3.2.5) und den Gleichungen (3.3.1 bis 2) erhält man für die Lüftungseffizienz:

$$\eta = \frac{\left(\int_{t_1}^{\infty} C_{exhaust}(t) dt\right)^2}{2 * \left(\int_{t_1}^{\infty} t * C_{exhaust}(t) dt\right)} \quad (3.3.3)$$

Das durchschnittliche Alter der Luft  $\tau_{air-exhaust-mean}$  entspricht der Fläche unter der Abklingkurve. Zur Ermittlung dieser Fläche können Verfahren wie das mathematische Verfahren der Trapezregel im Intervall zwischen zwei Messpunkten benutzt werden. So kann das Integral der Funktion numerisch angenähert werden.

Ab einem bestimmten Zeitpunkt wird der Kurvenverlauf exponentiell fallend.

### 3.4 Beispiel einer Messung mit der „concentration-decay“ Messmethode

Die abgebildete Kurve zeigt das Ergebnis einer Tracergasmessung in einem Badezimmer eines Neubaus. Es sollte herausgefunden werden, wie gut der Luftaustausch im Badezimmer funktioniert, da die Belüftung nach Empfinden der Bewohner unzureichend erschien.

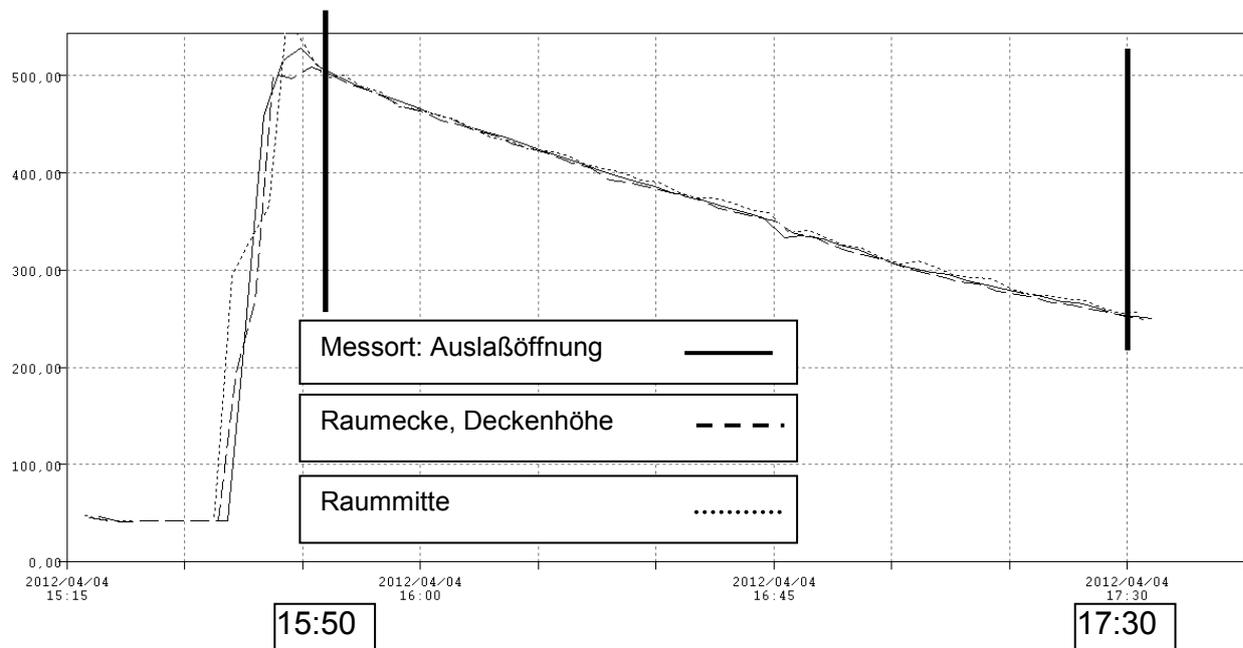


Abbildung 3.4.1: Gemessene Konzentrationsverläufe einer „concentration-decay“ Messung

Die Messwerte ergaben in etwa eine gleichmäßige Abklingkurve ab 15:50. Betrachtet man den Zeitraum zwischen 15:50 und 17:30, ergeben die Messwerte eine Luftwechselrate von etwa  $0,4 \frac{1}{h}$ .

$$n = \frac{\ln C_0 - \ln C}{t} = \frac{\ln(500 \cdot 10^{-6}) - \ln(260 \cdot 10^{-6})}{1,6h}$$

Mit einem Badezimmervolumen von  $V_R = 41m^3$

ergibt sich somit ein Abluftstrom von  $\dot{V}_A = n * V_R$

$$\dot{V}_A = 16,4 \frac{m^3}{h}$$

