

Möglichkeit zur Luftmengenreduzierung

Steigerung der Effektivität der Verdünnungsströmung durch Intermittierende Raumlüftung

Bei Mischströmung überwiegen im Gegensatz zur Verdrängungsströmung Strömungsmechanismen, die durch turbulente Austauschbewegungen der Luft verursacht werden. Die verstärkte Diffusion aufgrund der Fluktuationsbewegungen ist eine der wichtigsten Eigenschaften turbulenter Strömungen. Diese turbulente Querdiffusion begünstigt den Wärme- und Stoffaustausch in Luftströmungen mit inhomogener Stoff- und Temperaturverteilung. Dabei wird die in den eingebrachten Luftstrahlen (Primärluft) enthaltene Strömungsenergie dadurch abgebaut, dass Umgebungsluft (Sekundärluft) aus dem Raum angesaugt und dem Luftstrahl beigemischt wird. Es findet also am Strahlrand ein Impulsaustausch statt, der dazu führt, dass der Luftstrahl auf seinem Weg an Luftvolumen zunimmt und gleichzeitig an Geschwindigkeit verliert.

Der als Induktionsanteil bezeichnete, dem Strahl beigemischte Luftstrom ist um ein Vielfaches größer als der primäre Luftstrom. Hierdurch kommt es zu einer intensiven Raumdurchströmung und damit zu einer gleichmäßigen Luftverteilung. Dabei ist speziell der Turbulenzgrad der Strömung von wesentlicher Bedeutung. Nach Untersuchungen von Scheer über die Partikelquerausbreitung stromabwärts von einer punktförmigen Quelle in gleichmäßiger Strömung nimmt die Konzentration umgekehrt proportional zur Entfernung und mit steigendem Turbulenzgrad in einem nahezu linearen Verhält-

nis ab. Es ergeben sich dabei normalverteilte Profile der Partikelkonzentrationen, die auch bei Geschwindigkeitsverteilungen von Freistrahlen in ruhender Luft in ähnlicher Weise entstehen¹⁾.

Physikalische Grundlagen der Mischlüftung

Im Gegensatz zu laminaren Strömungen sind in einer turbulenten Strömung die Geschwindigkeiten stochastisch verteilt. Bei voll ausgebildeter Turbulenz werden permanent Fluidteilchen in Bewegung versetzt, während andere gleichzeitig wieder abgebremst werden. Aufgrund der permanenten Durchmi-

schung wird der Parallelbewegung der Primärströmung noch eine zusätzliche unregelmäßige Quergeschwindigkeit zur Hauptströmungsrichtung überlagert. Dadurch stellt sich bei einer turbulenten Strömung eine völlig andere Geschwindigkeitsverteilung ein als bei einer laminaren Strömung.

Infolge der besseren Durchmischung ergibt sich bei höherer Turbulenz ein höherer Stoff- und Wärmeübergang im Vergleich zur laminaren Strömung. In der Strömungstechnik verwendet man daher für die Bestimmung der Güte einer Mischströmung häufig den Begriff des Turbulenzgrades, der sich als das quadratische Mittel der Intensitätskomponenten in Strömungsrichtung (u) definiert:

$$Tu = \frac{1}{\bar{u}} \sqrt{\frac{1}{3}(u'^2 + v'^2 + w'^2)}$$

In isotroper Turbulenz im Raum vereinfacht sich der Ausdruck zu:

$$Tu \approx \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}}$$

wobei $\bar{u}$ die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist und u'^2 das gemittelte Quadrat der Geschwindigkeitsschwankung:

$$u'^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2$$

mit:

n Anzahl der Messwerte

u_i lokale und/oder zeitliche Luftgeschwindigkeit in m/s

Zur statistischen Betrachtung der Turbulenz werden also die Geschwindigkeit in den Mittelwert $\bar{u}$ und die lokale Schwankungsgeschwindigkeit u_i herangezogen.

Der Turbulenzgrad (Tu) gibt dabei das Verhältnis zwischen der lokalen Schwankungsgeschwindigkeit u_i und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

¹⁾ RIETSCHEL, Raumklimatechnik Band 2: Raumlüftung und Raumkühltechnik, 2008

Autoren



Dipl.-Ing. Christian Backes, Produktleiter und Prokurist von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Lehrbeauftragter am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Obmann der DIN 1946 Teil 4. Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 13053, EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803.



Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup, Geschäftsführer der Gesellschafter von HOWATHERM Klimatechnik GmbH. Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798, EN 13779, EN 308, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803.

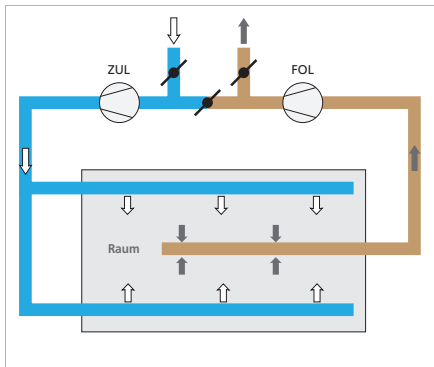


Bild 1

Konventioneller Betrieb über Zuluftstränge und Abluftstrang (stationäre Betriebsweise)

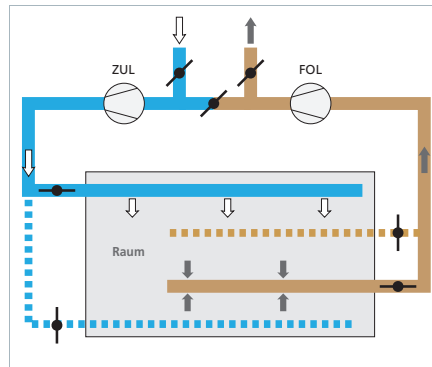


Bild 2

Betrieb über Zuluftstrang 1 und Abluftstrang 2 (Phase 1 des instationären Betriebs)

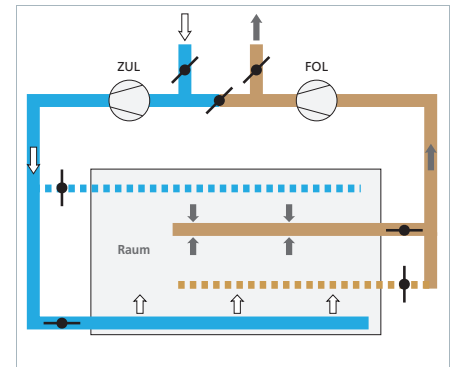


Bild 3

Betrieb über Zuluftstrang 2 und Abluftstrang 1 (Phase 2 des instationären Betriebs)

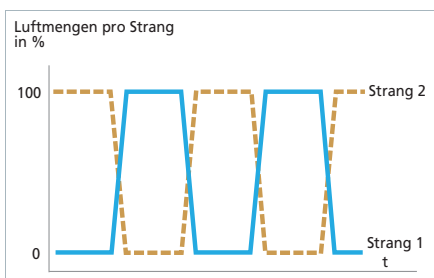


Bild 4

Schaltzustände im instationären vollständigen Umschaltbetrieb

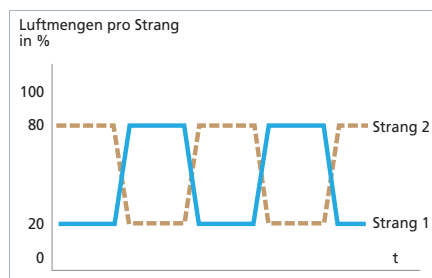


Bild 5

Schaltzustände im instationären teilweisen Umschaltbetrieb

keit $\bar{u}$ und damit die relative Schwankungsintensität innerhalb einer Strömung an.

Der Turbulenzgrad in konventionell belüfteten Räumen (Mischlüftung) liegt etwa zwischen 30 % und 60 %, während die Verdrängungslüftung Turbulenzgrade von unter 20 % aufweist.

Gleichzeitig muss bei Mischluftsystemen das Zugluftrisiko (Draught Rating) nach *Fanger* beurteilt werden²⁾. Diese Größe beschreibt den Prozentsatz Unzufriedener, die sich durch Zugluft gestört fühlen, und ermittelt sich aus der Beziehung:

$$DR = (34 - \vartheta_L) \cdot (\bar{v} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v} \cdot Tu + 3,14)$$

$$\cdot (0,37 \cdot \bar{v} \cdot Tu + 3,14)$$

Das Zugluftrisiko (DR) ist somit abhängig von den folgenden Größen:

ϑ_L Lufttemperatur in °C

$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Raum in m/s

Tu Turbulenzgrad in %

Das subjektive Empfinden von Luftbewegungen ist sehr verschiedenartig. Eine unerwünschte Form der Luftge-

schwindigkeit ist die sogenannte Zugluft, die als Zugescheinung wahrgenommen wird. Die Luftgeschwindigkeit wird je nach Lufttemperatur, Aktivitätsgrad, Bekleidungsgrad, Luftfeuchte und Änderungsfrequenz der Luftgeschwindigkeit unterschiedlich empfunden. Grundsätzlich empfinden Personen bei körperlicher Arbeit (Aktivitätsgrad) eine erhöhte Luftgeschwindigkeit als weniger störend.

Die zulässigen mittleren Luftgeschwindigkeiten sind als Funktion der Lufttemperatur und des Turbulenzgrades im Anhang A3, Bild A.2 der DIN EN ISO 7730 dargestellt.

Anlagentechnik im Vergleich

Üblicherweise werden heute RLT-Anlagen eingesetzt, die aus einem oder mehreren Abluftsträngen und einem oder mehreren Zuluftsträngen bestehen, welche kontinuierlich und damit stationär als Mischluftsysteme betrieben werden (Bild 1).

Der wesentliche Unterschied des intermittierenden Verfahrens mit einer alternierenden Betriebsweise der Raumlüftung gegenüber der herkömmlichen stationären Mischlüftung liegt in der

neuen Funktion der RLT-Anlage, die nicht mehr stationär und damit konventionell den Raum mit Luft versorgt³⁾.

Im instationären Verfahren wird die RLT-Anlage so betrieben, dass zwischen den einzelnen Zuluft- und Abluftsträngen intermittierend umgeschaltet wird und damit die einzelnen Stränge alternierend betrieben, also zeitlich abwechselnd beaufschlagt werden. Dabei werden die einzelnen Stränge in Zyklen so umgeschaltet, dass sich keine stationären Strömungszustände im Raum aufbauen können (Bild 2 und 3) und gleichzeitig der Impuls der Lüftung erhöht wird. So kann trotz des alternierenden Betriebs sowohl die Zuluft als auch die Abluft im RLT-Gerät kontinuierlich aufbereitet werden. Deshalb können konventionelle RLT-Geräte mit den üblichen Komponenten für diese neue Betriebsweise verwendet werden.

Mit diesem Verfahren wird systembedingt der gleiche Raumströmungseffekt erzielt, der auch mit dem 2007 entwickelten Umschaltregeneratorsystem erreicht wird⁴⁾.

Über Umschaltklappen in den einzelnen Kanalsträngen, insbesondere in den Zuluftsträngen, wird zwischen den einzelnen Betriebszuständen vollständig (Bild 4) oder teilweise umgeschaltet (Bild 5).

²⁾ DIN EN ISO 7730:2006–05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005

³⁾ Kaup, C.: Neues Verfahren zur Raumlufttechnik zur intermittierenden und instationären Raumlüftung, HLH Bd. 60 (2009) Nr. 3, S.44-51

⁴⁾ Patent DE 10 2007 012 198.0

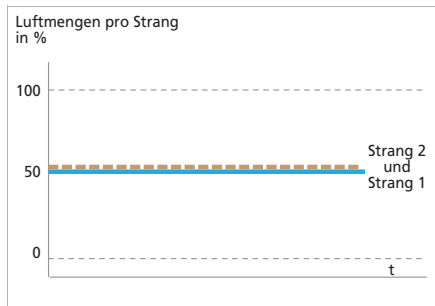


Bild 6
Zustände im stationären Teillastbetrieb

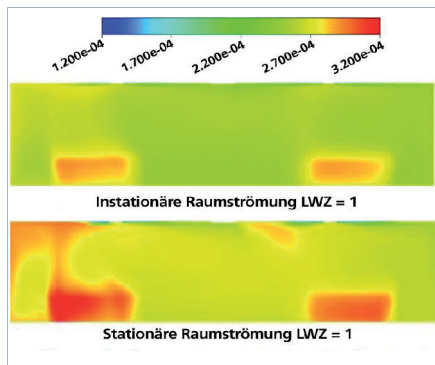


Bild 9
Konzentrationsverteilung des CO₂-Tracerstoffs
im Vergleich bei LWZ = 1

So besteht die Möglichkeit, die einzelnen Stränge nicht nur zwischen den Luftmengen 0 % und 100 %, sondern beispielsweise zwischen 20 % und 80 % alternierend zu betreiben. Damit können zwischen Volllastzustand und Teillastzuständen die optimalen Betriebszustände durch die Festlegung der Strömungsimpulse gewählt werden.

Im Volllastzustand, das heißt bei voller Luftmenge, kann die Anlage beispielsweise mit einem stationären Betriebszyklus von 100 / 100 % (alle Stränge komplett geöffnet), also konventionell betrieben werden, um eine Überdimensionierung der Komponenten (Kanäle und Auslässe) zu vermeiden.

Im Teillastbetrieb bei z. B. 50 % Luftmenge (**Bild 6**) kann der Betriebsmodus 0 % / 100 % aber auch z. B. 80 % / 20 % gewählt werden⁵⁾.

Verbesserter Teillastbetrieb

RLT-Anlagen werden selten bei voller Leistung, sondern meist im Teillastbereich betrieben, wobei die Komponenten für die Raumströmung auf den Dimensionierungsfall (Volllastbetrieb) optimal ausgelegt werden.

Werden aber z. B. Impulslüftungssysteme im Teillastbetrieb mit geringerer Luftmenge betrieben, verändert sich

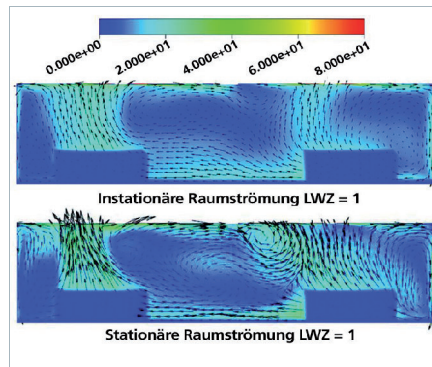


Bild 7
Strömungsgeschwindigkeiten (vertikaler Schnitt)
im Vergleich bei LWZ = 1⁷⁾

die Charakteristik der Luftauslässe (Strahleindringtiefe) erheblich. Durch die reduzierte Strahleindringtiefe im Teillastbetrieb wird das Regelverhalten der RLT-Anlage drastisch eingeschränkt, da die Anlage nicht mit der theoretisch erforderlichen Menge, sondern mit wesentlich höherem Volumenstrom betrieben werden muss. Somit wird bei konventionellem Betrieb das Regelverhalten reduziert und mögliche Energieeinspareffekte werden wesentlich verringert.

Beim intermittierenden Betrieb der Anlage wird bis zu einer Gesamtluftmenge von 50 % mindestens jeweils 1 Strang pro Periode (bei max. 2 Strängen) mit der maximalen Luftmenge beaufschlagt. Somit bleiben die Strömungsgeschwindigkeit der Auslässe bis 50 % der Sollluftmenge im jeweils dominanten Strang und auch die Strahleindringtiefe der jeweiligen Auslässe konstant.

Aber auch im Volllastbetrieb kann die Anlage gegebenenfalls alternierend betrieben werden, wenn die Luftwechselzahl gering ist und die Betriebsweise bei der Auslegung der Kanäle und Auslässe berücksichtigt wird.

Strömungssimulationen

Bei 3D-Strömungssimulationen (CFD⁶⁾), die nach vergleichenden Berechnungen an der instationären und an einer konventionellen Lüftungsanlage durch den TÜV Süd vorgenommen wurden, stellte sich heraus, dass durch die intermittierende Betriebsweise (instationäre Strömung) die benötigten Luftwechsel reduziert werden können, denn die Luftmischung wird durch die Impulslüftung signifikant verbessert. Hierbei wurde eine konventionelle Lüftungsanlage (stationäre Raumströmung) mit einer Luftwechselzahl LWZ

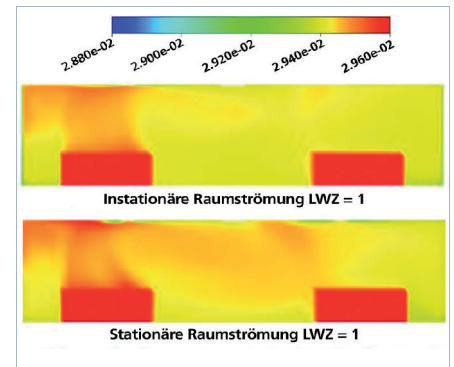


Bild 8
Temperaturverteilung im Vergleich bei LWZ = 1

von 1 und 2 mit einer intermittierenden Anlage (instationäre Raumströmung) mit einem Luftwechsel von 1 und 2 verglichen.

Dabei ergab sich, dass trotz der höheren Ausblasgeschwindigkeiten am Gitter die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Raum ungerichteter waren (**Bild 7**).

Es zeigte sich weiterhin, dass sowohl die Temperaturverteilung in der Mittelebene des Raumes (**Bild 8**) als auch die CO₂-Konzentration des verwendeten Tracerstoffes sehr homogen verteilt waren und eindeutig bessere Ergebnisse im Vergleich zur konventionellen stationären Lüftung erzielt wurden (**Bild 9**). Dieses Ergebnis ist deshalb so beachtenswert, da sich theoretisch nach den allgemeinen Mischungsregeln bei gleicher Luftmenge auch gleiche Konzentrationen im Raum hätten einstellen müssen. Tatsächlich haben sich allerdings die mittleren Raumkonzentrationen im direkten Vergleich bei reduzierten Raumströmungsgeschwindigkeiten deutlich um 8 % verringert. Dies kann auf die Konzentration des Tracerstoffes in sogenannten Hotspots, also Raumzonen, die nicht effektiv durch die Raumströmung erfasst werden, erklärt werden. Weiterhin können Kurzschlussffekte zwischen Zu- und Abluft die unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen ermöglichen (siehe auch Projektversuch Mehrzweckhalle).

Wenn nun keine erhöhten thermischen oder stofflichen Lasten abgeführt

⁵⁾ Patent DE 10 2009 009 109.2 Raumlufttechnisches Verfahren

⁶⁾ CFD Computational Fluid Dynamics durch den TÜV Süd 2008/2009

⁷⁾ Untersuchungen verschiedener Varianten zur Hallenbelüftung mit dem 3D-Strömungssimulationsprogramm ANSYS CFX

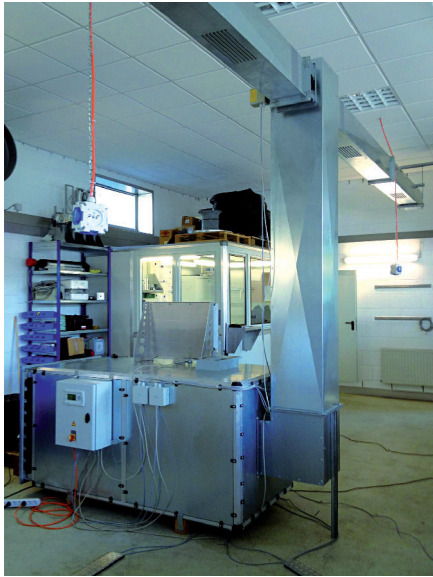


Bild 10

Versuchsaufbau (RLT-Gerät mit zwei Zuluftsträngen)

werden müssen, die zwingend eine höhere Luftmenge fordern, kann mit dem instationären Verfahren die Lüftungseffektivität auch mit niedrigeren Luftmengen bei weiter gesteigerter Behaglichkeit sichergestellt werden. Durch die bessere Temperaturverteilung können aber auch höhere Temperaturdifferenzen an den Auslässen toleriert werden.

Validierung im Laborversuch

Um die beschriebenen theoretischen Erkenntnisse der Simulationen zu bestätigen, wurde im lufttechnischen Labor ein Raumströmungsversuch unter nahezu isothermen Rahmenbedingungen durchgeführt⁸⁾.

Hierzu wurde ein RLT-Gerät mit zwei Zuluftsträngen verwendet, die mit schnelllaufenden Luftregelklappen ausgestattet waren und in der Raummitte ca. 80 cm unterhalb der Decke angeordnet wurden (Bild 10).

Der untersuchte Raum hatte eine Grundfläche von 12 x 9 m und eine Raumhöhe von 4 m. Der Nennvolumenstrom wurde mit 2 000 m³/h und einer Luftwechselrate von 4,6 gewählt.

Die Zuluft wurde als Umluft dem Raum nahezu isotherm (+ 1 K Ventilatorerwärmung) zugeführt. Dabei wurden insgesamt 4 Lüftungsgitter verwendet, die für jeweils max. 500 m³/h dimensioniert wurden (Bild 11).

Mit diesem Versuchsaufbau wurden drei verschiedene Betriebsmodi untersucht:

1. Volllastzustand mit 2 000 m³/h im konventionellen Betrieb (LWZ = 4,6)

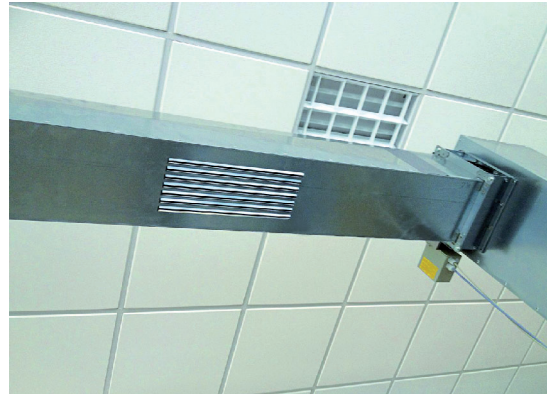


Bild 11

Zuluftgitter mit Strangregelklappe

- b. 1,75 m Raumhöhe

- c. 2,5 m Raumhöhe

In jeder Position wurden jeweils vier richtungsunabhängige Raumströmungssensoren (Anemometer) und damit insgesamt 16 Messpositionen verwendet. Es wurde ein Messzyklus von 2 Sekunden über eine Gesamtdauer von ca. 20 Minuten gewählt, um eine repräsentative Raumströmung erfassen zu können.

Man erkennt aus Bild 12, dass die Raumluftgeschwindigkeiten im Direktfeld der Auslässe erwartungsgemäß am höchsten sind. Im Auslegungsfall bei 2 000 m³/h beträgt die mittlere Raumluftgeschwindigkeit 0,22 m/s mit einer Standardabweichung von 0,065 m/s. Wird die Anlage im Teillastbetrieb bei 50 % der Nennluftmenge betrieben, reduziert sich die Luftgeschwindigkeit auf 0,14 m/s mit einer Standardabweichung von 0,045 m/s im konventionellen Betrieb. Aber auch im instationären Betrieb der Anlage bleiben die mittleren Geschwindigkeiten im Raum praktisch konstant.

Man erkennt aber, dass die Luftgeschwindigkeit im Diffusfeld tendenziell beim intermittierenden Betrieb steigt.

Weiterhin können aus den gemessenen Luftgeschwindigkeiten die lokalen Turbulenzgrade in den verschiedenen Messebenen bestimmt werden (Bild 13).

Es ist aus den Ergebnissen gut zu erkennen, dass sowohl der Mittelwert der Turbulenz als auch die lokalen Turbulenzgrade der verschiedenen Ebenen proportional zu den gewählten Taktzeiten der intermittierenden Lüftung signifikant steigen.

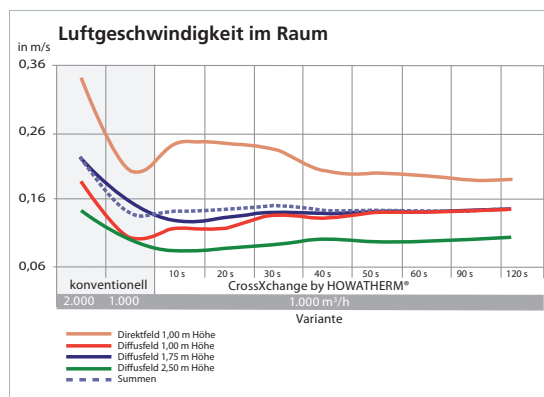


Bild 12

Raumluftgeschwindigkeiten in m/s

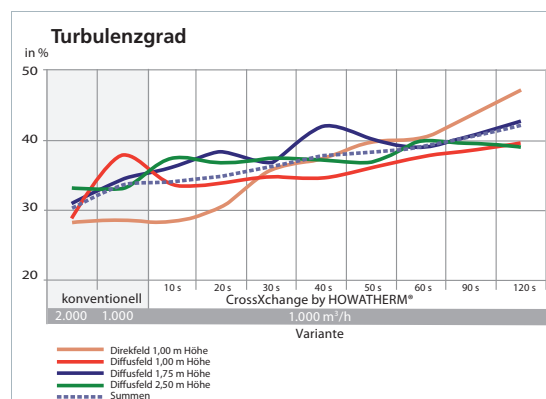


Bild 13

Turbulenzgrade der Raumströmung in %

2. Teillastzustand mit 1 000 m³/h im konventionellen Betrieb (LWZ = 2,3)

3. Teillastzustand mit 1 000 m³/h im intermittierenden Betrieb (LWZ = 2,3)

Im intermittierenden Betrieb wurde zusätzlich die Taktzeit der Umschaltzyklen von 10 bis 120 s variiert. Dabei wurden die sich einstellenden Raumströmungsgeschwindigkeiten an folgenden Positionen gemessen:

1. Im Direktfeld der Zuluftauslässe in 1,0 m Höhe über dem Boden

2. Im Diffusfeld der Raumströmung in:
 - a. 1,0 m Raumhöhe

⁸⁾ Kaup, C., *Instationäre Raumluftströmung durch intermittierende Mischlüftung, Höhere Luftqualität mit geringerer Luftmenge*, Gentner Verlag, TGA Fachplaner 02/2013

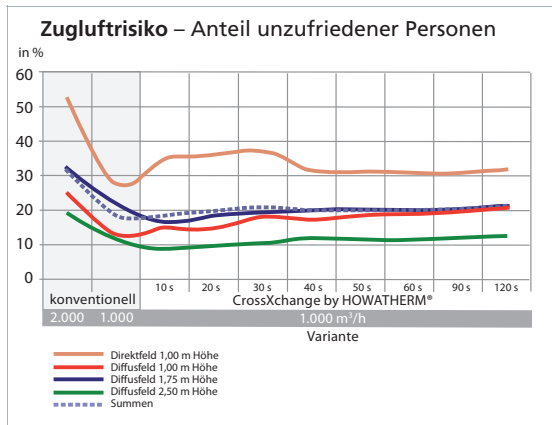


Bild 14

Zugluftrisiko (Draught Rating nach Fanger)

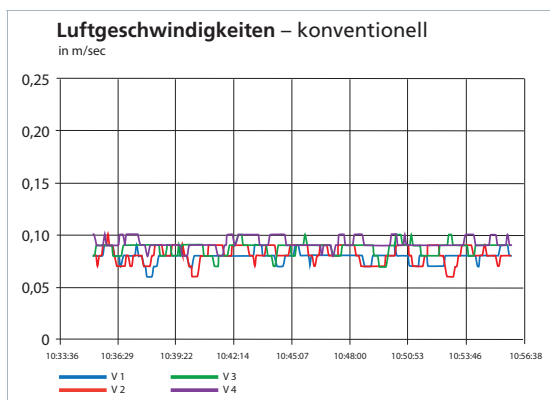


Bild 16

Luftgeschwindigkeiten (konventionelle RLT) in m/s bei 8 000 m³/h über die Zeit

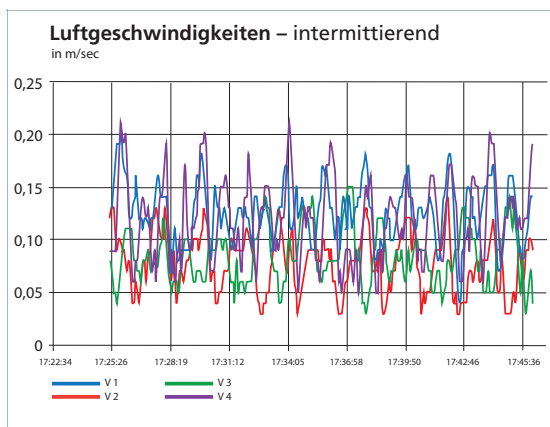


Bild 17

Luftgeschwindigkeiten (intermittierende RLT) in m/s bei 8 000 m³/h über die Zeit

Im konventionellen Betrieb lagen die Turbulenzgrade sowohl bei Nennluftmenge als auch im Teillastbetrieb bei rund 30 %. Im instationären Betrieb der Anlage stiegen die Turbulenzgrade auf etwa 40 % (+ 30 %) an. Dies bedeutet, dass die Standardabweichung der mitt-

Man erkennt aus **Bild 14**, dass das höchste Zugluftrisiko mit 32 % im Auslegungsfall bei maximaler Luftmenge im konventionellen Betrieb gegeben ist. Im Teillastbetrieb beim konventionellen Betrieb reduziert sich das Zugluftrisiko auf 18 %. Auch im instationären Betrieb liegt das Zugluftrisiko im Mittel bei 19 bis 21 % und damit auf dem vergleichbaren Niveau der konventionellen Lüftung im Teillastbetrieb.



Bild 15

Mehrfachfunktionshalle am Umwelt-Campus Birkenfeld

leren Luftgeschwindigkeit im Teillastbetrieb mit halber Luftmenge in etwa wieder das Niveau des Auslegungsfalles bei 2 000 m³/h erreicht.

In einer turbulenten Strömung entstehen hochfrequente Schwankungsbewegungen in allen Richtungen, welche der Hauptströmungsrichtung überlagert sind. Diese Schwankungsbewegungen verursachen eine effizientere Durchmischung und bewirken einen kinetischen Energieaustausch zwischen den einzelnen Strömungsschichten.

Je höher der Turbulenzgrad der Strömung ist, desto schneller mischen sich die beiden Fluide (Sekundärluft und Primärluft). Dabei entsteht eine homogenere Temperatur-, Feuchte- und Partikelverteilung im Raum.

Gleichzeitig wurde im Versuch auch das Zugluftrisiko (Draught Rating) beurteilt.

Zusammenfassung der Labor-Versuchsergebnisse

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass auch im instationären Teillastbetrieb (Luftwechselzahl = 2,3) das Zugluftrisiko das Niveau des Auslegungsfalles (Luftwechselzahl = 4,6) beim konventionellen Betrieb nie erreicht. Gleichzeitig erhöhen sich aber die Turbulenzgrade der Raumströmung charakteristisch, wodurch die Mischung speziell im Teillastbetrieb der Raumluft wesentlich verbessert wird.

Dies wurde auch im Rauchversuch sichtbar. Im direkten Vergleich verteilte sich der eingebrachte Rauch im instationären Betrieb der Anlage sichtbar schneller im Raum als im konventionellen Betrieb.

Damit kann im Vergleich zur konventionellen Lüftung entweder bei geringerer Luftmenge eine vergleichbare Luftverteilung realisiert, oder bei gleicher Luftmenge kann eine bessere und homogenere Luftverteilung erreicht werden.

Validierung im Projektversuch

In einem speziellen Projekt wurden umfangreiche strömungstechnische Untersuchungen durchgeführt, und zwar in einer im Jahr 2013 errichteten Sporthalle auf dem Umwelt-Campus Birkenfeld mit einer Nutzfläche von ca. 1 480 m² (**Bild 15**).

Zur Be- und Entlüftung wurde ein RLT-Gerät mit einer Luftmenge von 10 400 m³/h installiert. Mit einem Volumen der Halle von 12 580 m³ ergibt sich bei maximalem Volumenstrom der An-

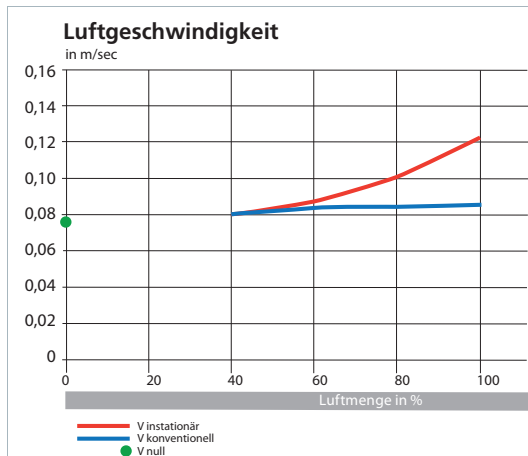


Bild 18
Mittlere Raumluftgeschwindigkeiten im Vergleich*

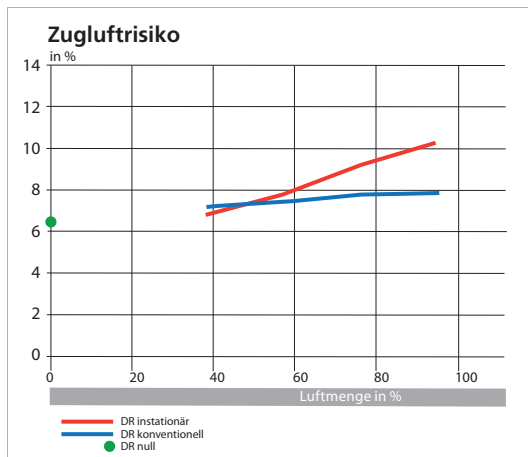


Bild 19
Mittlere Turbulenzgrade im Vergleich*

zeit von 60 Sekunden) bei 40 % bis 100 % mit einer Schrittweite von 20 % strömungstechnisch ermittelt (**Bild 16** und **17**).

Auf Basis der gemessenen Luftgeschwindigkeiten wurden die Turbulenzgrade sowie das Zugluftrisiko bestimmt. Die mittleren Luftgeschwindigkeiten stiegen in der intermittierenden Betriebsweise von 0,08 m/s (40 % Luftmenge) auf 0,12 m/s bei voller Luftmenge an, während im konventionellen Betrieb die Luftgeschwindigkeiten bei etwa 0,08 m/s, also knapp oberhalb der natürlichen Raumströmung durch Konvektion verharren (**Bild 18**).

Aus **Bild 19** wird deutlich, dass der Turbulenzgrad bei intermittierender Betriebsweise sowohl im Teillast- als auch im Volllastfall wesentlich ansteigt und etwa um den Faktor 2 bis 3 höher liegt als bei konventionellem Betrieb.

Im Teillastbetrieb wird außerdem ersichtlich, dass der Turbulenzgrad beim konventionellen Betrieb durch Konvektionseffekte überlagert wird und dadurch mit abnehmender Menge ansteigt, während in der intermittierenden Betriebsweise der Turbulenzgrad bei maximaler Luftmenge am höchsten ist und bei geringerer Menge entsprechend sinkt.

Letztendlich wurde bei konventioneller Betriebsweise tatsächlich keine Verdünnungsströmung erreicht, sondern nur eine laminare Strömung. Das Zugluftrisiko liegt in beiden Fällen auf einem sehr niedrigen Niveau bei maximal 10 % (**Bild 20**). Gemäß EN 15251 wird in Tabelle B.1 für die beste Kategorie I ein erwarteter Prozentsatz an Unzufriedenheit

festgelegt. Das Zugluftrisiko liegt in beiden Fällen auf einem sehr niedrigen Niveau bei maximal 10 % (**Bild 20**). Gemäß EN 15251 wird in Tabelle B.1 für die beste Kategorie I ein erwarteter Prozentsatz an Unzufriedenheit

festgelegt. Das Zugluftrisiko liegt in beiden Fällen auf einem sehr niedrigen Niveau bei maximal 10 % (**Bild 20**). Gemäß EN 15251 wird in Tabelle B.1 für die beste Kategorie I ein erwarteter Prozentsatz an Unzufriedenheit

*bei 40 % bis 100 % der Luftmenge mit einer Schrittweite von 20 % (konventionelle und intermittierende RLT)

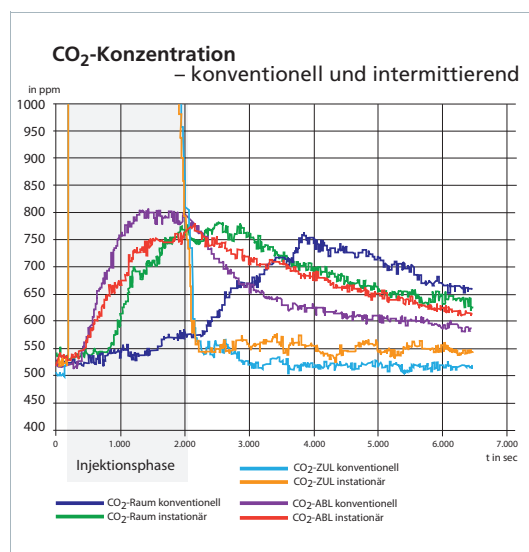


Bild 20
Mittleres Zugluftrisiko im Vergleich*

lage eine Luftwechselrate von 0,82 pro Stunde.

Die Messungen fanden im moderaten Heizbetrieb bei einer Zulufttemperatur von 19 °C bei einer Hallentemperatur von etwa 15 °C statt. Die Zuluft wurde

über zwei Zuluftstränge mit jeweils vier Weitwurfdüsen in der Halle verteilt, die Abluft zentral an einer Seite der Halle abgesaugt. Das Raumlüftungssystem basiert dabei auf einer Verdünnungsströmung.

Bild 21
CO₂-Konzentrationen im Vergleich

Im ersten Schritt wurden analog zum Laborversuch mittels vier Anemometern die ungerichteten Strömungsgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich der Halle in einer Höhe von 1,75 m erfasst, wobei die Grundfläche sowohl in der Länge wie in der Breite geometrisch gleichmäßig aufgeteilt wurde.

Im Vergleich zur konventionellen Raumlüftung wurde der intermittierende Betrieb (instationär mit einer Takt-

Bautafel

Projekt	Zweckverband Sporthalle
Bauherr	Verbandgemeinde Birkenfeld und Gemeinde Hoppstädten-Weiersbach
Architekt	Prof. Dr. Matthias Sieveke, Dekan FB Gestaltung Hochschule Trier University of Applied Sciences
Planer	IPRO RHEINLAND Niederlassung der IPRO DRESDEN Planungs- und Ingenieuraktiengesellschaft, Büro Daun, 54550 Daun
Anlagenbauer	Diehl GmbH, 55774 Baumholder

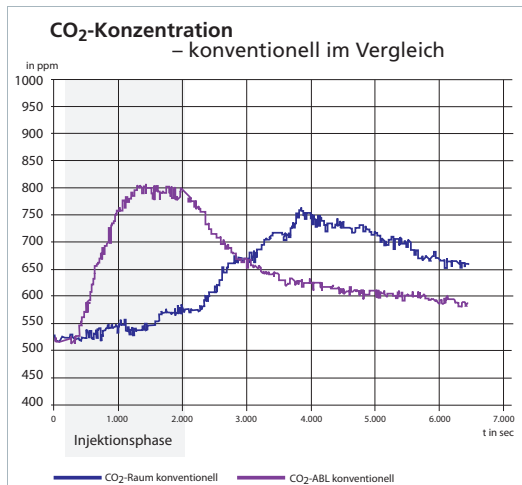


Bild 22

CO₂-Konzentrationen im Vergleich (konventionelle RLT)

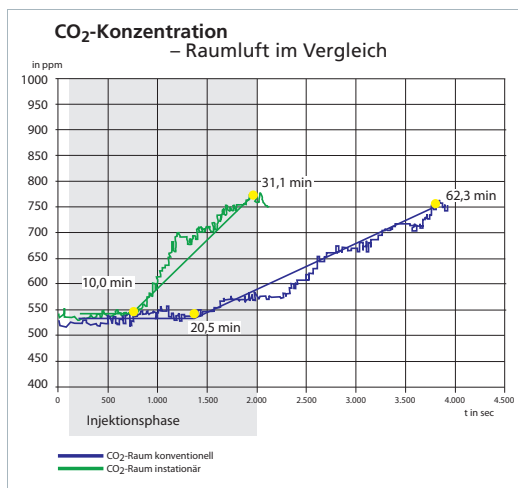


Bild 24

CO₂-Konzentrationen der Raumluft im Vergleich

denen von 15 % toleriert⁹⁾. Somit wurde weder im konventionellen Betrieb noch im intermittierenden Betrieb ein signifikantes Zugluftrisiko festgestellt.

In einem zweiten Versuch wurde in beiden Betriebsmodi CO₂ als Tracerstoff der Zuluft zugeführt. Die Injektion erfolgte in beiden Fällen über 30 Minuten mit gleicher Konzentration von maximal 1 800 ppm (**Bild 21**).

Beim konventionellen Betrieb erkennt man in **Bild 22** deutlich, dass die Tracergas-Konzentration in der Abluft sehr früh und sehr deutlich ansteigt, bevor im Aufenthaltsbereich eine nennenswerte Steigerung festzustellen ist. Demnach müssen in diesem Betriebszustand signifikante Kurzschlusseffekte konstatiert werden, da der Tracerstoff, lange bevor er die Aufenthaltszone erreicht, in der Abluft nachzuweisen ist.

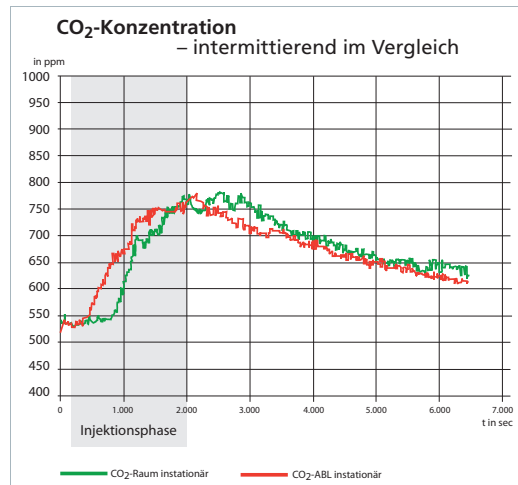


Bild 23

CO₂-Konzentrationen im Vergleich (intermittierende RLT)

Beim intermittierenden Betrieb ergibt sich ein völlig anderes Bild (**Bild 23**).

Es verlaufen die Abluft- und Raumluftkonzentrationen des Tracergases wesentlich weniger phasenverschoben als im konventionellen Betrieb (**Bild 22** und **23**).

Man erkennt in diesem Fall deutlich, dass die Raumluftkonzentration nur sechs Minuten nach der Abluft-Konzentration ebenfalls deutlich ansteigt. Außerdem liegt hier die Konzentration des Tracergases in der Raumluft, verglichen mit der Abluft, höher, was bei konventionellem Betrieb nicht der Fall ist, da deutlich mehr Tracergas im Kurzschlussstrom verstärkt direkt zur Abluft gelangt und damit nicht die Aufenthaltszone erreichen kann.

Das mittlere Alter der Raumluft ergibt sich aus dem jeweiligen Integral über den beiden Kurven der Anstiegssituation (Step up-Versuch) im Vergleich. Dabei werden die einzelnen Messwerte nach folgenden Gleichungen¹⁰⁾ aufsummiert:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_i + C_{i-1}}{2} \right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \cdot \frac{(t_i + t_{i-1})}{2} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_i + C_{i-1}}{2} \right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \right]}$$

$$\tau_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{C_i + C_{i-1}}{2} \right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \right]}{C_{\infty}}$$

wobei:

$\bar{\tau}$ mittleres Raumluftalter in Sekunden

oder Minuten

τ_n Nominale, Zeitkonstante

C_i Tracergaskonzentration im Abluftstrom zum Zeitpunkt

$C_{\infty \text{ max.}}$ durchschnittliche Tracergaskonzentration der Injektion (1 400 ppm)

Hieraus ergibt sich für die konventionelle Lüftung ein mittleres Raumluftalter von 23,2 Minuten während der Injektionsphase und beim intermittierenden Betrieb von 19,4 Minuten. Die nominalen Zeitkonstanten (τ_n) ergeben sich mit 14,2 Minuten bei durchschnittlich 1 425 ppm im intermittierenden und 11,6 Minuten bei durchschnittlich 1 396 ppm im konventionellen Betrieb.

Aus den Zeiten kann die Luftwechseleffektivität (ε) berechnet werden:

$$\varepsilon = \frac{\tau_n}{2 \cdot \bar{\tau}}$$

Somit ergibt sich für den konventionellen Betrieb eine Luftwechseleffizienz von 24,9 % und für den intermittierenden Betrieb von 36,6 %. Je weiter die Luftwechseleffizienz bei einer Mischluftströmung unter 50 % liegt, desto höher ist der Kurzschlussstrom von der Zuluft zur Abluft.

In **Bild 24** werden beide Raumluftkonzentrationen (konventionelle und intermittierende Lüftung) im Vergleich dargestellt. Im Step up-Versuch ist die wesentlich schnellere Ausbreitung des Tracerstoffes beim intermittierenden Betrieb zu erkennen.

Nach 10 Minuten beginnt die Konzentration nach der CO₂-Injektion zu steigen (im konventionellen Betrieb erst nach 20,5 Minuten). Nach 31,1 Minuten ist die maximale Konzentration erreicht (im konventionellen Betrieb nach 62,3 Minuten). Die Mischzeit im intermittierenden Betrieb ist also rund um den Faktor 2 kürzer als im konventionellen Betrieb. Im Umkehrschluss folgt ein schneller Abbau von Schadstoffen bei intermittierendem Betrieb.

⁹⁾ Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007

¹⁰⁾ Ventilation Effectiveness, Rehva Guidebook No. 2, 2004



Bild 25
Lüftungseffektivität während der Injektion (Step up)

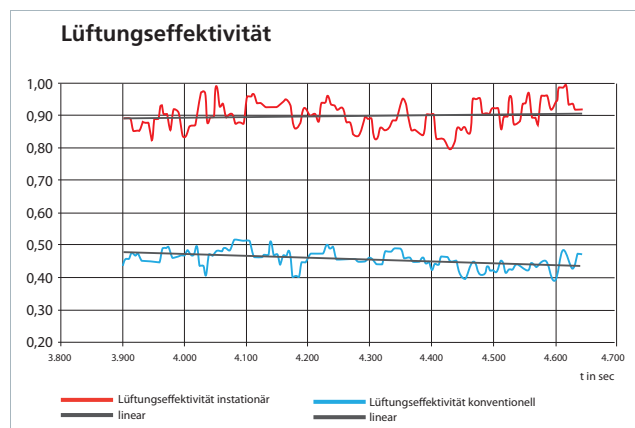


Bild 26
Lüftungseffektivität im Abklingen (Step down)

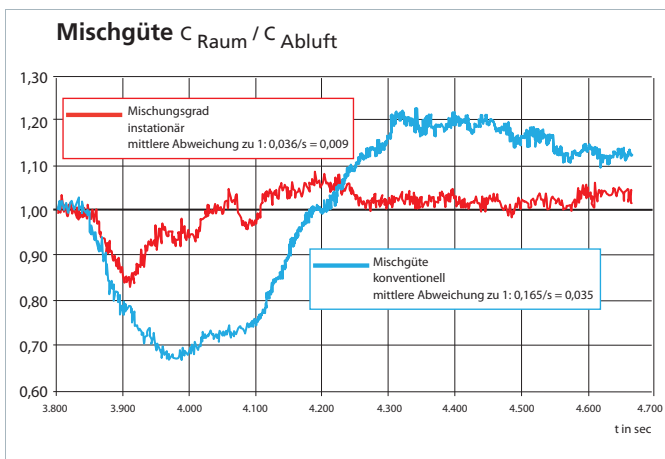


Bild 27
Mischgüte im Vergleich

Lüftungseffektivität und Mischgüte

Im Weiteren werden die Lüftungseffektivität (LE) sowie die Mischgüte (MG) (auch Belastungsgrad genannt) betrachtet. Sie errechnen sich aus:

$$LE = \frac{c_{Abluft} - c_{Zuluft}}{c_{Raum} - c_{Zuluft}} \quad \text{und} \quad MG = \frac{c_{Raum}}{c_{Abluft}}$$

wobei:

c_{Abluft} Abluftkonzentration des Tracer-gases in ppm

c_{Zuluft} Zuluftkonzentration des Tracer-gases in ppm

c_{Raum} Raumluftkonzentration des Tracergases in ppm

Die Änderung der Lüftungseffektivität während der Injektion wird dabei

evident. Die Lüftungseffektivität lag im konventionellen Betrieb bei etwa 0,6, während im intermittierenden Betrieb die Effektivität bei etwa 0,95 lag (**Bild 25**).

Im Abklingverhalten (Step down) fiel der Unterschied ähnlich aus (**Bild 26**). Die mittlere Lüftungseffektivität lag bei rund 90 % im instationären Betrieb und etwa bei 45 % im konventionellen Betrieb (**Bild 26**).

Vergleicht man die Mischgüte (auch Raumbelastungsgrad oder Kontaminationsgrad genannt), wird deutlich, dass die mittlere Abweichung zur optimalen Mischgüte mit einem Wert von 1,0 bei konventionellem Betrieb bei durchschnittlich 16,5 % mit einer Standardabweichung von 3,5 % lag, während bei intermittierendem Betrieb die Abweichung bei 3,6 % bei einer Standardabweichung von nur 0,9 % betrug (**Bild 27**). Die Verbesserung der Mischgüte liegt dabei beim intermittierenden Betrieb bei einem Faktor von 4,6, während sich die Standardabweichung um den Faktor 3,9 verbessert.

Fazit

Durch das intermittierende Raumlüftungsverfahren verbessern sich hauptsächlich im Teillastbetrieb nicht nur die Lüftungseffektivität und die Durchmischung des Raumes, sondern es erhöht sich auch die Energieeffizienz durch die dadurch mögliche Luftmengenreduzierung. Gleichzeitig kann aber auch im Vollastbetrieb, insbesondere bei kleinen Luftwechselzahlen, die Effektivität der Raumströmung deutlich verbessert werden.

Durch die intermittierende Be- und Entlüftung wird neben der Lüftungseffektivität auch die Mischgüte – also die Durchmischung des Raumes – wesentlich verbessert. Bei den Strömungssimulationen, die durch den TÜV Süd unter Verwendung des alternierenden Verfahrens erstellt wurden, sowie bei den Versuchen im speziellen Projekt zeigte sich, dass durch die intermittierende Betriebsweise die benötigten Luftwechsel wesentlich reduziert werden können. Gleichzeitig bleibt das Zugluftrisiko gering und die Luftqualität verbessert sich erheblich, da sich zusätzlich die Behaglichkeit im Raum fühlbar erhöht, weil sich die Schadstoffbelastung (z. B. CO₂) verringert, da Schadstoffe schneller abgebaut werden.

Dieser Umstand wirkt sich letztendlich wirtschaftlich vorteilhaft bei der Dimensionierung der Anlagen aus, da hierdurch elektrische und thermische Energie eingespart werden kann.