TGA FACHPLANER
MAGAZIN FÜR TECHNISCHE GEBÄUDEAUSRÜSTUNG
Erschienen in TGA 02.2013

Instationäre Raumluftströmung durch intermittierende Mischlüftung

Höhere Luftqualität mit geringerer Luftmenge

Theoretische Untersuchungen, Simulationsberechnungen, Strömungsvisualisierungen und Messungen belegen, dass die instationäre Raumluftströmung durch eine intermittierende Mischlüftung die Lüftungseffektivität, die Luftqualität und die Behaglichkeit im Raum – vor allem im Teillastbetrieb – wesentlich verbessert. Daraus ergeben sich schon bei der Auslegung attraktive Potenziale zur Einsparung von Betriebs- und auch von Investitionskosten.

KOMPAKT INFORMIEREN

Durch eine intermittierende Umschaltung zwischen einzelnen Zuluft- und Abluftsträngen kann der Aufbau stationärer Strömungszustände in einem Raum verhindert werden.

Dabei erfolgt die Luftaufbereitung kontinuierlich, sodass für diese Betriebsweise konventionelle RLT-Zentralgeräte eingesetzt werden können.

Durch die vollständige oder teilweise Umschaltung bleibt bei geringerem Luftwechsel im Raum die Luftmenge an den beaufschlagten Luftdurchlässen in dem Bereich, der für die notwendige Strahleindringtiefe erforderlich ist.

Dadurch wird bei Impulslüftungssystemen der luftmengenseitige Regelbereich signifikant erweitert. Gleichzeitig wird gegenüber dem stationären Auslegungsfall der Turbulenzgrad erhöht.

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.

Die in den eingebrachten Luftstrahlen (Primärluft) enthaltene Strömungsenergie wird 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 zu einer gleichmäßigen Luftverteilung, wobei speziell der Turbulenzgrad der Strömung von wesentlicher Bedeutung ist.

Nach Untersuchungen von Scheer [1] 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 Verhältnis ab. Es ergeben sich dabei Profile mit normal verteilten Partikelkonzentrationen, die auch bei Geschwindigkeitsverteilungen von Freistrahlen in ruhender Luft in ähnlicher Weise entstehen [2].

Im Gegensatz zu laminaren Strömungen sind in einer turbulenten Strömung die Geschwindigkeiten stochastisch verteilt. Zur statistischen Betrachtung der Turbulenz werden die Geschwin-

WICHTIG FÜR TGA-PLANER, ANLAGENBAUER UND BAUHERREN

TGA-PLANER: Bei Mischlüftungssystemen ergeben sich aus dem intermittierenden Betrieb mit instationärer Raumströmung erhebliche Vorteile für die Betriebskosten, die Luftqualität und die Behaglichkeit. Zusätzlich besteht fallbezogen unter Beachtung der sicheren Abführung stofflicher Lasten die Option, die RLT-Anlage kleiner zu dimensionieren.

ANLAGENBAUER: Wird die intermittierende Mischlüftung über die Umschaltung einzelner Zuluft- und Abluftstränge als Regelkonzept realisiert, entspricht der Auslegungsfall der konventionellen stationären Mischlüftung (alle Stränge sind dann in Betrieb). Beim RLT-Gerät ergeben sich keine Änderungen.

BAUHERREN: Das Konzept „instationäre Raumströmung durch eine intermittierende Mischlüftung" ermöglicht es, bei Teillast die Luftmenge deutlich stärker als bei der stationären Mischlüftung zu minimieren und damit die Kosten für die Luftförderung und -aufbereitung deutlich zu senken.

Dr.-Ing. Christoph Kaup ist Lehrbeauftragter für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung am Umwelt-Campus Birkenfeld der FH Trier, Chairman der Arbeitsgruppe „Non-residential Ventilation" in EVIA (European Ventilation Industry Association) für den Herstellerverband Raumlufttechnische Geräte e. V., Mitglied in verschiedenen Normungsgremien und Richtlinienausschüssen sowie Geschäftsführender Gesellschafter von Howatherm Klimatechnik, Brücken, www.howatherm.de

digkeit in den Mittelwert $\bar{v}$ und die lokale Schwankungsgeschwindigkeit v_i herangezogen. Der Turbulenzgrad (Tu) gibt das Verhältnis zwischen der lokalen Schwankungsgeschwindigkeit v_i und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}$ und damit die relative Schwankungsintensität innerhalb einer Strömung an.

$$Tu = \frac{s_v}{\bar{v}}$$

Tu Turbulenzgrad der Luft in %
$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Raum in m/s
s_v Standardabweichung der einzelnen Geschwindigkeiten

$$s_v = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(v_i - \bar{v})^2}$$

n Anzahl der Messwerte
v_i lokale und/oder zeitliche Luftgeschwindigkeit in m/s

Der Turbulenzgrad in konventionell belüfteten Räumen liegt etwa zwischen 30 und 60 %.

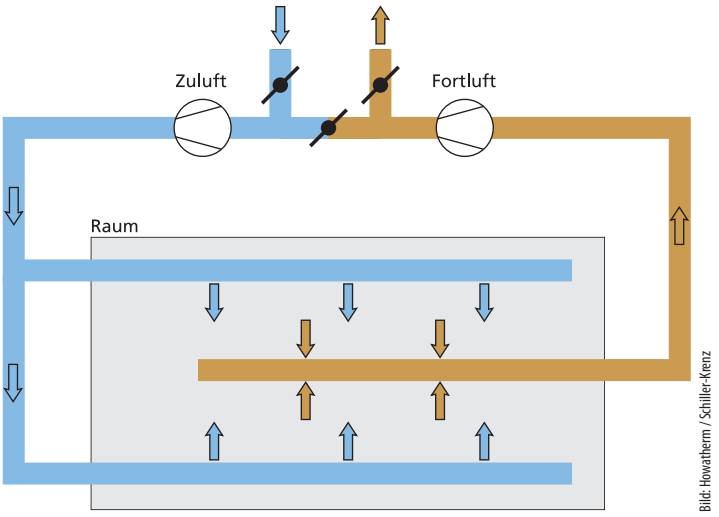
Gleichzeitig muss bei Mischluftsystemen das Zugluftrisiko (Draught Rating, DR) nach Fanger beurteilt werden [3]. Diese Größe beschreibt den Prozentsatz „Unzufriedener", das heißt den Anteil der Personen, die sich durch Zugluft gestört fühlen. Sie setzt sich aus folgenden Faktoren zusammen:

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

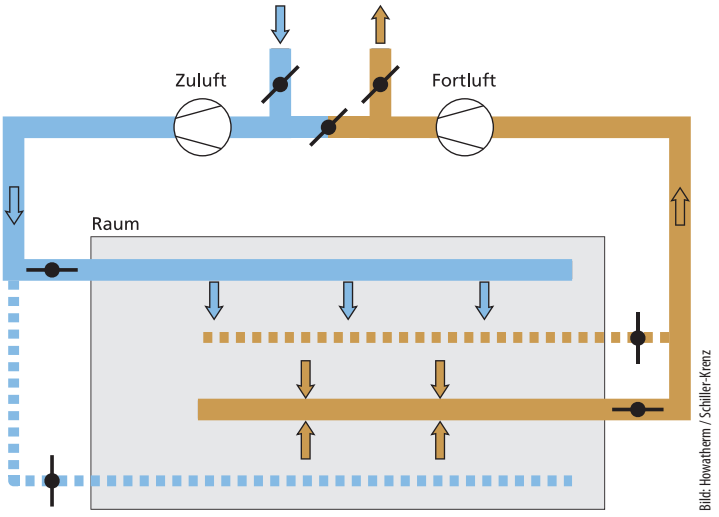
Das Zugluftrisiko DR ist somit abhängig von den folgenden Größen:

ϑ_L Lufttemperatur in °C
$\bar{v}$ mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Raum in m/s
Tu Turbulenzgrad in %

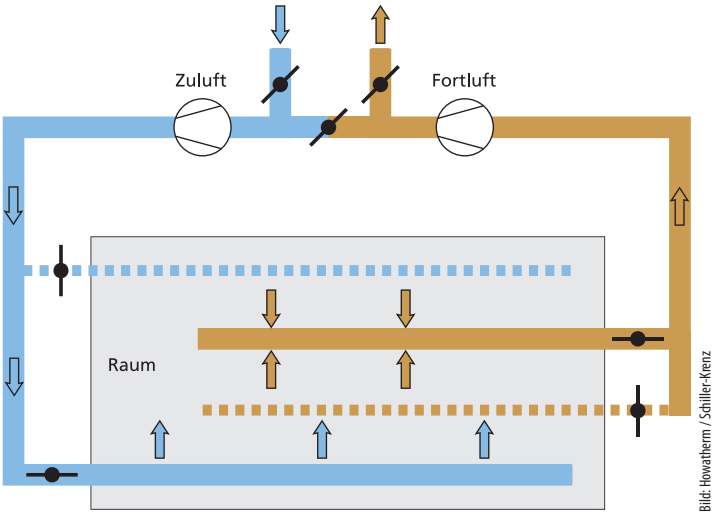
Das subjektive Empfinden von Luftbewegungen ist sehr verschiedenartig. Eine unerwünschte Form der Luftgeschwindigkeit ist die sogenannte Zugluft. Deren Geschwindigkeit wird je nach Lufttemperatur, Aktivitätsgrad, Luftfeuchte, Änderungsfrequenz der Luftgeschwindigkeit und der Art, wie die betroffenen Personen bekleidet sind, 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 in DIN EN ISO 7730 im Anhang A3, Bild A.2 dargestellt.



❶ **Konventioneller Betrieb einer RLT-Anlage über Zuluftstränge und Abluftstränge (stationäre Betriebsweise).**



❷ **Betrieb einer RLT-Anlage über Zuluftstrang 1 und Abluftstrang 2 (Phase 1 des instationären Betriebs).**



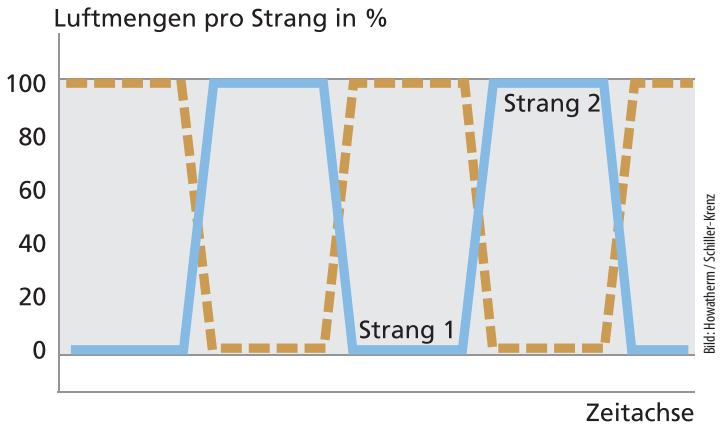
❸ **Betrieb einer RLT-Anlage über Zuluftstrang 2 und Abluftstrang 1 (Phase 2 des instationären Betriebs).**

Verfahren im Vergleich

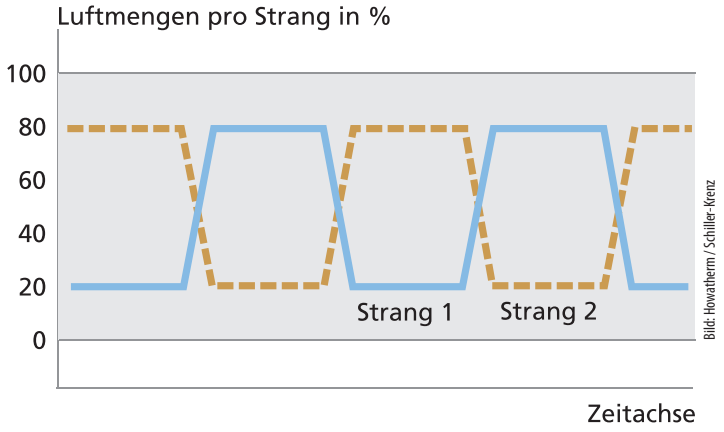
Üblicherweise werden heute RLT-Anlagen eingesetzt, die aus einem oder mehreren Abluftsträngen und einem oder mehreren Zuluftsträngen bestehen, welche kontinuierlich und damit stationär als Mischluftsysteme betrieben werden ❶.

Der wesentliche Unterschied des intermittierenden Verfahrens mit einer alternierenden Betriebsweise der Raumlüftung gegenüber der herkömmlichen stationären Mischlüftung besteht in der neuen Funktion der RLT-Anlage, die nicht mehr stationär den Raum mit Luft versorgt [4].

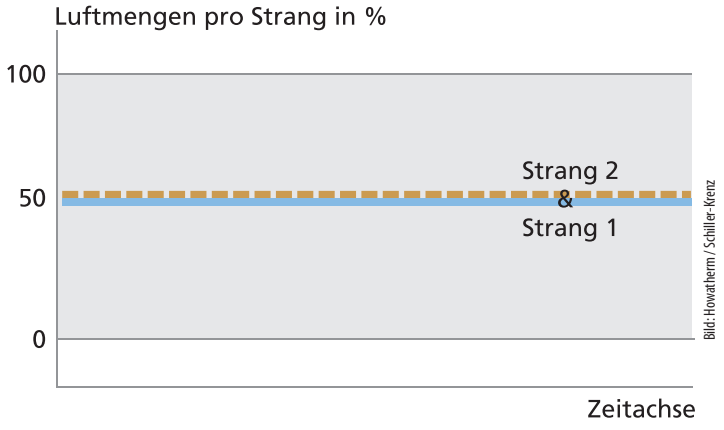
Im instationären Verfahren wird die RLT-Anlage so betrieben, dass zwischen den einzelnen Zuluft- und Abluftsträngen intermittierend umgeschaltet wird und damit die einzelnen Stränge alternierend betrieben, also zeitlich abwechselnd beaufschlagt werden. Dabei werden die einzelnen Stränge in einem Zyklus umgeschaltet, sodass sich keine stationären Strömungszustände im Raum aufbauen können ❷ ❸. Gleichzeitig kann dabei trotz des alternierenden Betriebs sowohl die Zuluft als auch die Abluft im RLT-Gerät kontinuierlich aufbereitet werden. Somit können konventionelle RLT-Geräte mit den üblichen Komponenten für diese neue Betriebsweise verwendet werden.



❹ **Schaltzustände im instationären vollständigen Umschaltbetrieb.**



❺ **Schaltzustände im instationären teilweisen Umschaltbetrieb.**



❻ **Schaltzustände im stationären Teillastbetrieb.**

Hierbei wird systembedingt mit diesem Verfahren der gleiche Raumströmungseffekt erzielt, der auch mit dem 2007 entwickelten Umschaltregenerator System TwinXchange erreicht wird [4]. Über Umschaltklappen in den einzelnen Kanalsträngen wird zwischen den einzelnen Betriebszuständen vollständig ❹ oder teilweise umgeschaltet ❺.

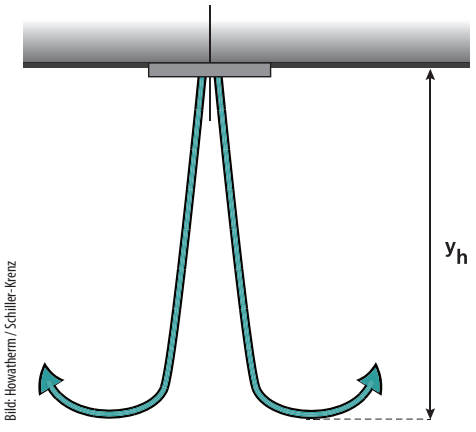
So besteht beispielsweise die Möglichkeit, die einzelnen Stränge nicht nur zwischen den Luftmengen 0 und 100 % umzuschalten, sondern beispielsweise zwischen 20 und 80 % alternierend zu betreiben. Damit können zwischen Volllastzustand und Teillastzuständen die optimalen Betriebszustände durch die Festlegung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

Im Volllastzustand, das heißt bei voller Luftmenge, wird die Anlage mit einem stationären Betriebszyklus von 100/100 % (alle Stränge komplett geöffnet), also konventionell betrieben, um eine Überdimensionierung der Komponenten (Kanäle und Auslässe) zu vermeiden, damit im Teillastbetrieb die Vorteile der instationären Betriebsweise in vollem Umfang genutzt werden können ❻. Im Teillastbetrieb mit beispielsweise 50 % der Nennluftmenge kann der Betriebsmodus 0 % / 100 % aber auch 20 % / 80 % gewählt werden [5].

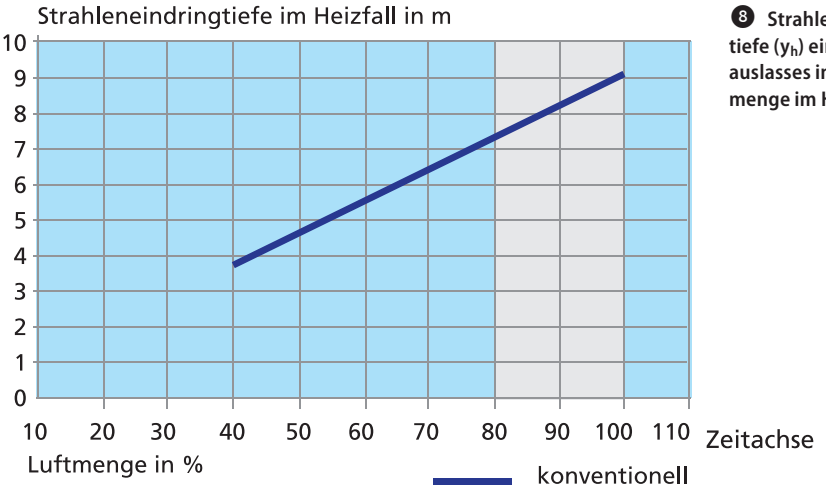
Verbesserter Teillastbetrieb

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 zum Beispiel Impulslüftungssysteme im Teillastbetrieb mit geringerer Luftmenge betrieben, verändert sich die Charakteristik der Luftauslässe (Strahleindringtiefe) erheblich. Dies wird am Beispiel eines beliebigen Drallauslasses im Heizbetrieb bei einer Temperaturdifferenz von 10 K exemplarisch deutlich ❼ ❽.

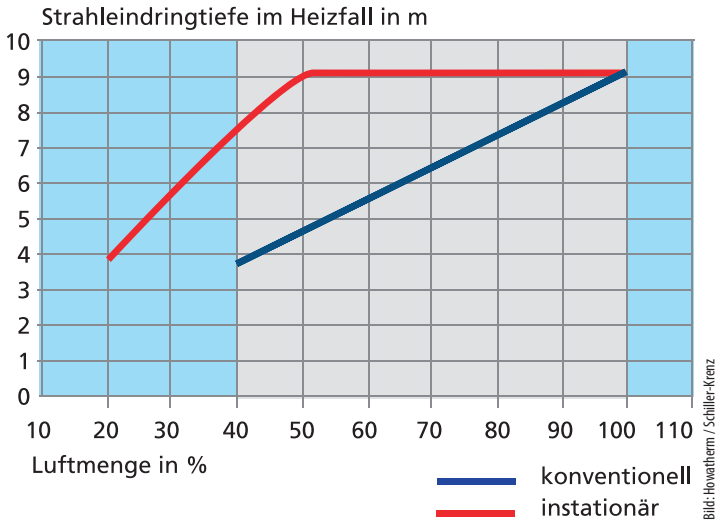


❼ **Strahleindringtiefe (y_h) eines Drallauslasses.**

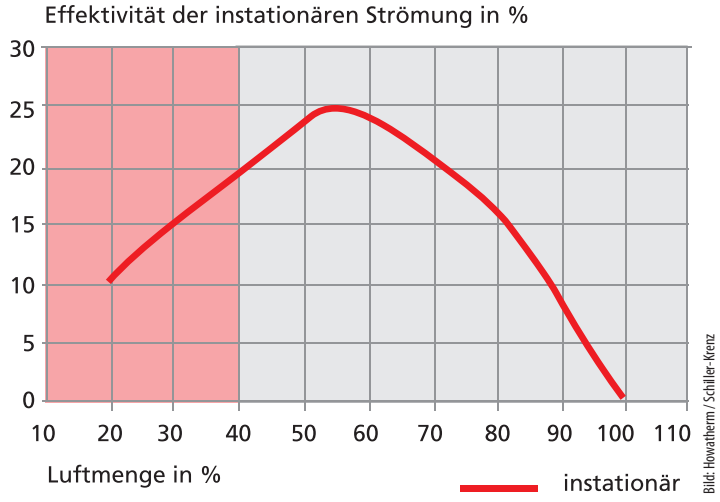


❽ **Strahleindringtiefe (y_h) eines Drallauslasses in m zur Luftmenge im Heizfall.**

Bild: Howatherm / Schiller-Krenz



❾ **Vergleich der Strahleindringtiefe (y_h) eines Drallauslasses in m zur Luftmenge im Heizfall.**



❿ **Verbesserung der Lüftungseffektivität im instationären Betrieb gegenüber dem stationären Betrieb.**

Hier wird ersichtlich, dass die Strahleindringtiefe bei konstanter Temperaturdifferenz (dt) proportional mit sinkender Luftgeschwindigkeit abnimmt. Zwar kann ein Drallauslass prinzipiell zwischen 40 % und 100 % der Sollluftmenge variabel betrieben werden, allerdings erkennt man aus ❽, dass dann die Strahleindringtiefe im Beispiel bei dt = 10 K von 9,1 m auf 3,8 m sinkt.

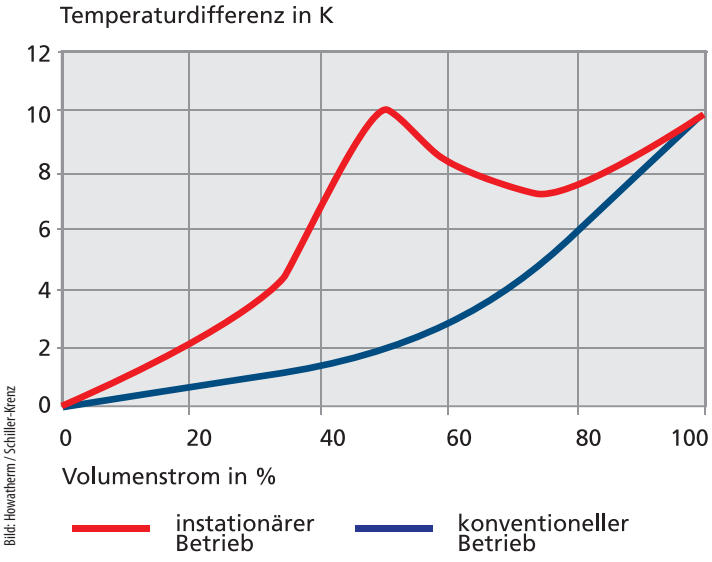
Soll aber die Strahleindringtiefe mindestens 7,3 m betragen, um den Aufenthaltsbereich noch mit Zuluft zu versorgen, wird klar, dass der Luftauslass nur bis maximal 80 % seiner Sollluftmenge betrieben werden kann. Durch diese Limitierung wird der Regelbereich der RLT-Anlage drastisch eingeschränkt, da die Anlage mit mindestens 80 % ihrer Auslegungsmenge betrieben werden muss. Somit wird der Regelbereich in diesem Beispiel von 40 bis 100 % auf 80 bis 100 % beschränkt, wodurch gleichzeitig die Energieeinspareffekte wesentlich verringert werden.

Beim instationären Betrieb der Anlage wird bis zu einer Gesamtluftmenge von 50 % mindestens jeweils ein Strang pro Periode mit der maximalen Luftmenge versorgt, für den die Auslässe ausgelegt wurden. Somit bleibt die Strömungsgeschwindigkeit der Auslässe bis 50 % der Sollluftmenge im jeweils dominanten Strang konstant und auch die Strahleindringtiefe bleibt im Beispiel bei 9,1 m konstant ❾.

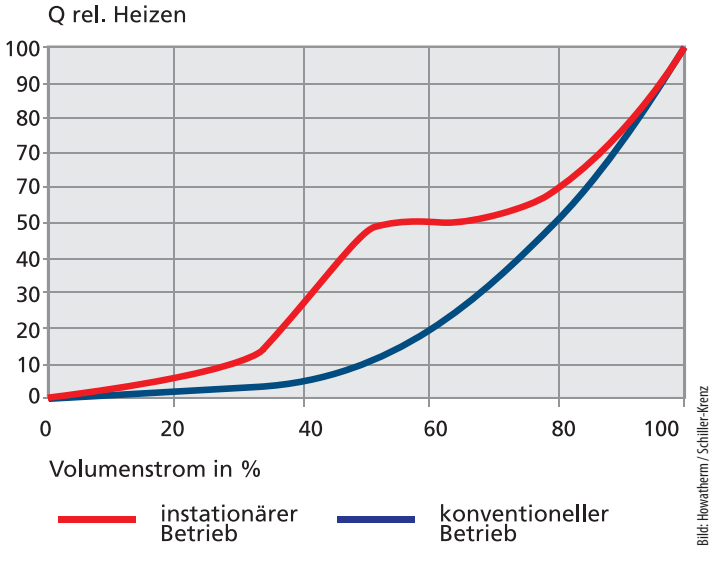
Die noch zu tolerierende Strahleindringtiefe von 7,3 m wird im instationären Betrieb erst bei einer Luftmenge von 40 % der Sollluftmenge erreicht. Damit kann das instationäre Verfahren tatsächlich bis zu einer Luftmenge von 40 % bei gleichzeitig verbesserter Lüftungseffektivität funktionsfähig betrieben werden.

Die Verbesserung der Lüftungseffektivität im instationären Betrieb gegenüber dem stationären Betrieb stellt ❿ dar, wobei der Bereich unter 40 % zwar theoretisch genutzt werden könnte, aber bei einer tolerierten Mindeststrahltiefe (im Vergleich zur konventionellen Lüftung 80 %) nicht sinnvoll zu verwenden ist.

Betrachtet man die mögliche Temperaturübertragung eines Drallauslasses, ergibt sich ein ähnliches Bild. Bei voller Luftmenge kann ein Auslass beispielsweise eine Temperaturdifferenz von 10 K bei maximaler Strahltiefe in den Aufenthaltsbereich „übertragen". Wird die Luftmenge im Teillastbetrieb gesenkt, verringert sich bei konstanter Zulufttemperatur die mög-



⓫ **Temperaturübertragung eines Drallauslasses im Heizbetrieb.**



⓬ **Leistungsübertragung eines Drallauslasses im Heizbetrieb.**

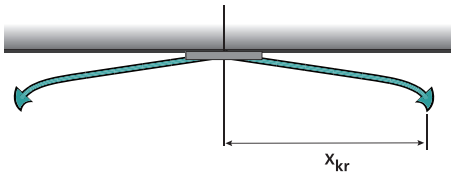


Bild: Howatherm / Schiller-Kienz

⓭ **Kritischer Strahlweg (x_{kr}) eines Drallauslasses.**

liche Temperaturübertragung im konventionellen Betrieb sehr deutlich ⓫.

Im instationären Betrieb kann dagegen die mittlere Temperaturdifferenz der beiden alternierend betriebenen Stränge eindeutig erhöht werden. Somit erhöht sich ebenfalls die mögliche Wärmeleistung signifikant, die bei gleicher Zulufttemperatur in den Aufenthaltsbereich übertragen werden kann. ⓬ stellt im Vergleich die mögliche relative Leistung dar, welche in Abhängigkeit der Luftmengen bei konstanter Zulufttemperatur übertragen wird. An diesem Beispiel erkennt man eindeutig die Steigerung der Effizienz durch die Verwendung der instationären Lüftung.

Ein geringerer Einfluss ergibt sich im Kühlfall, da dort die Impulslüftung üblicherweise entlang der Decke erfolgt ⓭. Zwar folgt der kritische Strahlweg (x_{kr}) den gleichen Gesetzen, denen auch die Strahleindringtiefe zugrunde liegt, allerdings fällt durch die Luftführung entlang der Decke der Einfluss auf den Aufenthaltsbereich offensichtlich geringer aus, als dies beim Heizen (Strahleindringtiefe) der Fall ist.

Validierung im Versuch

Um die beschriebenen theoretischen Erkenntnisse zu bestätigen, wurde im lufttechnischen Labor ein Raumströmungsversuch unter nahezu isothermen Rahmenbedingungen durchgeführt. Hierzu wurde ein RLT-Gerät mit zwei Zuluftsträngen verwendet, die mit schnell laufenden Luftregelklappen ausgestattet waren und in der Raummitte ca. 80 cm unterhalb der Decke angeordnet wurden ⓮.

Der untersuchte Raum hatte eine Grundfläche von 12 × 9 m und eine Raumhöhe von 4 m. Der Nennvolumenstrom wurde mit 2000 m^3/h und einer Luftwechselrate von 4,6 h^{-1} gewählt. Die Zuluft wurde als Umluft dem Raum nahezu isotherm (+ 1 K aufgrund der Erwärmung durch den Ventilator) zugeführt. Dabei wurden insgesamt vier Lüftungsgitter verwendet, die für jeweils maximal 500 m^3/h ausgelegt waren ⓯. Mit diesem Versuchsaufbau wurden drei Betriebsmodi untersucht:

1. Volllastzustand mit 2000 m^3/h
   im konventionellen Betrieb (LWZ = 4,6 h^{-1})
2. Teillastzustand mit 1000 m^3/h
   im konventionellen Betrieb (LWZ = 2,3 h^{-1})
3. Teillastzustand mit 1000 m^3/h
   im intermittierenden Betrieb (LWZ = 2,3 h^{-1})

Im intermittierenden Betrieb wurde zusätzlich die Taktzeit der Umschaltzyklen von 10 bis 120 s variiert und dabei 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:
   – 1,0 m Raumhöhe
   – 1,75 m Raumhöhe
   – 2,5 m Raumhöhe

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

Man erkennt aus ⓰, dass die Raumluftgeschwindigkeiten im Direktfeld der Auslässe erwartungsgemäß am höchsten sind. Im Auslegungsfall bei 2000 m^3/h beträgt die mittlere Raumluftgeschwindigkeit 0,22 m/s mit einer Standardabweichung von 0,065. 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 im konventionellen Betrieb. Auch im instationären Betrieb der Anlage bleiben die mittleren Geschwindigkeiten im Raum praktisch konstant. Man erkennt jedoch, dass die Luftgeschwindigkeit im Diffusfeld tendenziell beim intermittierenden Betrieb steigt.

Aus den gemessenen Luftgeschwindigkeiten können die lokalen Turbulenzgrade in den verschiedenen Messebenen bestimmt werden ⓱. Es ist anhand der Messwerte 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.

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 mittleren Geschwindigkeit in etwa wieder das Niveau des Auslegungsfalles bei 2000 m^3/h erreicht.

In einer turbulenten Strömung entstehen hochfrequente Schwankungsbewegungen in allen Richtungen, welche von der Hauptströmungsrichtung überlagert sind. Diese Schwankungsbewegungen verursachen eine 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). Dadurch entsteht eine homogene Geschwindigkeits-, Temperatur- und Partikelverteilung im Raum.

Des Weiteren erkennt man aus ⓱, dass die Turbulenzgrade in den verschiedenen Ebenen eine geringere Streuung aufweisen. Es konnte auch durch Bestimmung der Änderungsgrade zwischen den einzelnen Sensoren nachgewiesen werden, dass die Mittelwerte der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bei intermittierender Betriebsweise geringer streuten.

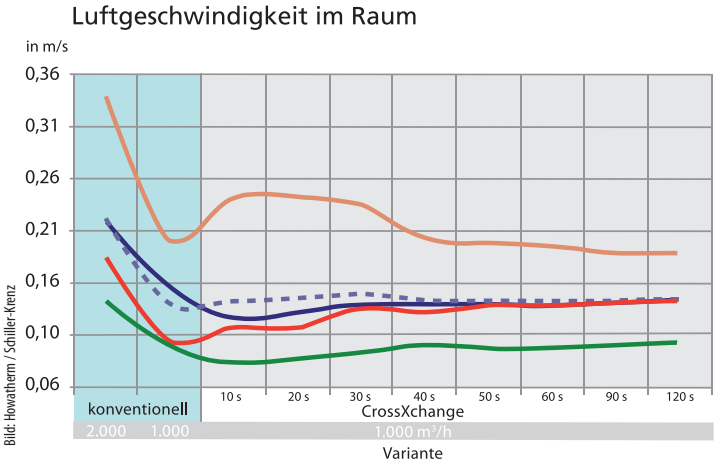
Gleichzeitig wurde im Versuch auch das Zugluftrisiko (Draught Rating) beurteilt. Man erkennt aus ⓲, dass das höchste Zugluftrisiko mit 30 % im Auslegungsfall bei maximaler Luftmenge im konventionellen Betrieb gegeben ist. Im Teillastbetrieb beim konventionellen Betrieb reduziert sich das Zugluftrisiko auf 17 %. Auch im instationären Betrieb liegt das Zugluftrisiko im Mittel bei 18 bis 19 % und damit auf dem Niveau der konventionellen Lüftung.

Bild: Howatherm

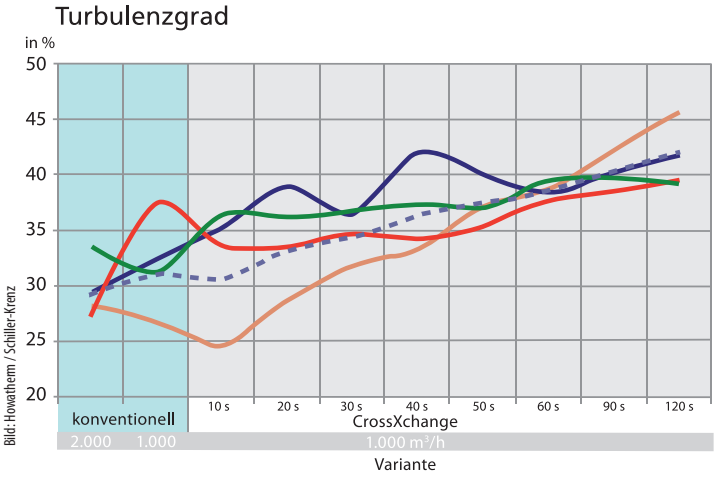
⓮ **Versuchsaufbau (RLT-Gerät mit zwei Zuluftsträngen).**

Bild: Howatherm

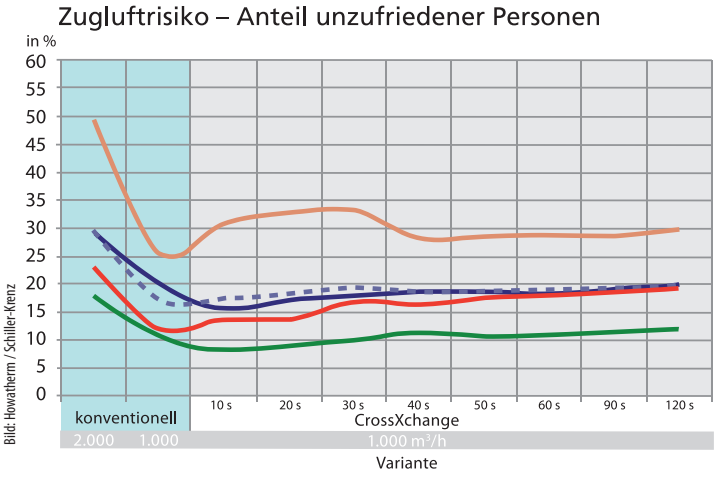
⓯ **Zuluftgitter mit Strangregelklappe des Versuchsaufbaus.**



16 Raumluftgeschwindigkeiten bei 50 % Teillast und unterschiedlicher Taktzeit der Umschaltzyklen im intermittierenden Betrieb im Vergleich zum konventionellen Betrieb.



17 Turbulenzgrade der Raumströmung bei 50 % Teillast und unterschiedlicher Taktzeit der Umschaltzyklen im intermittierenden Betrieb im Vergleich zum konventionellen Betrieb.



18 Zugluftrisko (Draught Rating nach Fanger) bei 50 % Teillast und unterschiedlicher Taktzeit der Umschaltzyklen im intermittierenden Betrieb im Vergleich zum konventionellen Betrieb.

In einem weiteren Versuch wurden die Luftgeschwindigkeit und der Turbulenzgrad der instationären Lüftung in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms untersucht. Dabei wurde auf der Messebene in 1,75 m Höhe mit vier Strömungssensoren über eine Zykluszeit von ca. 20 min die Raumströmung erfasst. Im Gegensatz zum konventionellen Betrieb stieg die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im instationären Betrieb in der untersuchten Ebene durchschnittlich um ca. 10 % 19.

Es konnte festgestellt werden, dass die Raumströmungsgeschwindigkeiten bei mittleren Luftmengen noch über der natürlichen Raumströmungsgeschwindigkeit von 0,08 m/s lagen, welche durch Grundthermik im Raum verursacht wurde. Während im konventionellen Betrieb bereits bei rund 800 m^3/h eine Raumströmungsgeschwindigkeit kleiner 0,1 m/s erreicht wurde, wurde diese Geschwindigkeit im instationären Betrieb erst bei einem Volumenstrom von 500 m^3/h und darunter unterschritten. Gleichzeitig war der mittlere Turbulenzgrad ebenfalls im instationären Betrieb deutlich höher 20.

Insbesondere bei mittleren Volumenströmen zwischen 900 und 1600 m^3/h tritt dieser Effekt eindeutig hervor. Im Bereich unter 900 m^3/h war die Messung aufgrund der niedrigen Luftgeschwindigkeiten jedoch mit einem relativ hohen Messfehler behaftet und ist deshalb nur eingeschränkt aussagekräftig. Aus diesem Grund ergeben sich bei der Betrachtung im stabilen Strömungsbereich Trendkurven, welche die gewonnenen theoretischen Zusammenhänge bestätigen 21.

Bewertung der Versuchsergebnisse

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass selbst im instationären Teillastbetrieb das Zugluftrisiko das Niveau des Auslegungsfalls 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 als im konventionellen Betrieb.

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

Die zuvor in der Theorie beschriebenen Vorteile der instationären Lüftung konnten besonders im mittleren Luftmengenbereich im praktischen Versuch klar belegt werden.

Strömungssimulationen

Bei 3D-Strömungssimulationen (CFD [7]), die nach vergleichenden Berechnungen an der instationären und an einer konventionellen Lüftungsanlage durch den TÜV Süd vorgenommen wurden, stellte sich ebenfalls heraus, dass durch die intermittierende Betriebsweise (instationäre Strömung) die benötigten Luftwechsel reduziert werden können und die Luftqualität durch die Impulslüftung signifikant verbessert wird. Hierbei wurde eine konventionelle Lüftungsanlage (stationäre Raumströmung) mit einer Luftwechselzahl (LWZ) von 1 h^{-1} mit einer intermittierenden Anlage (instationäre Raumströmung) mit einem Luftwechsel von 1 h^{-h} verglichen.

Dabei ergab sich, dass trotz der höheren Ausblasgeschwindigkeiten am Gitter die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Raum ungerichteter waren 22. Auf diese Weise können die Behaglichkeit und der Komfort gesteigert werden, da sich durch die erzwungene instationäre Raumströmung (diffuses Strömungsfeld) geringere stationäre Raumströmungswalzen aufbauen.

Es zeigte sich weiterhin, dass sowohl die Temperaturverteilung in der Mittelebene des Raums 23 als auch die CO_2-Konzentration des verwendeten Tracerstoffes sehr homogen verteilt waren und eindeutig bessere Ergebnisse im Vergleich zur konventionellen stationären Lüftung erzielt wurden 24. Dieses Ergebnis ist deshalb so beachtenswert, da sich theore-

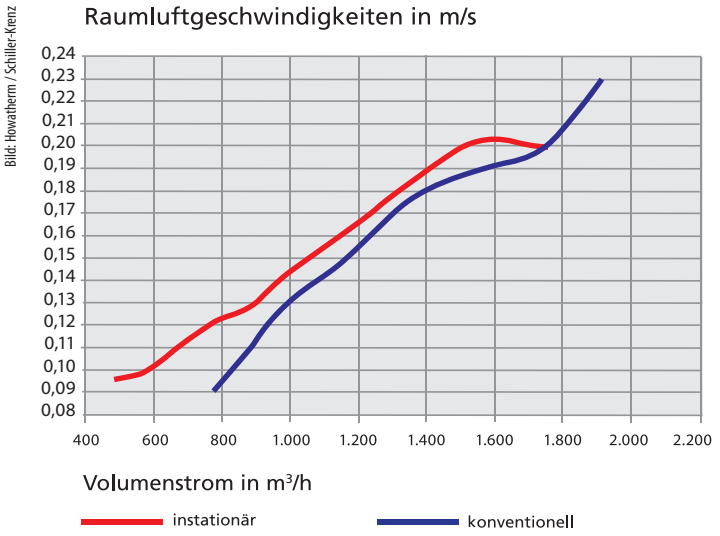


Bild: Howatherm / Schiller-Krenz

19 Raumluftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Volumenstroms im Vergleich.

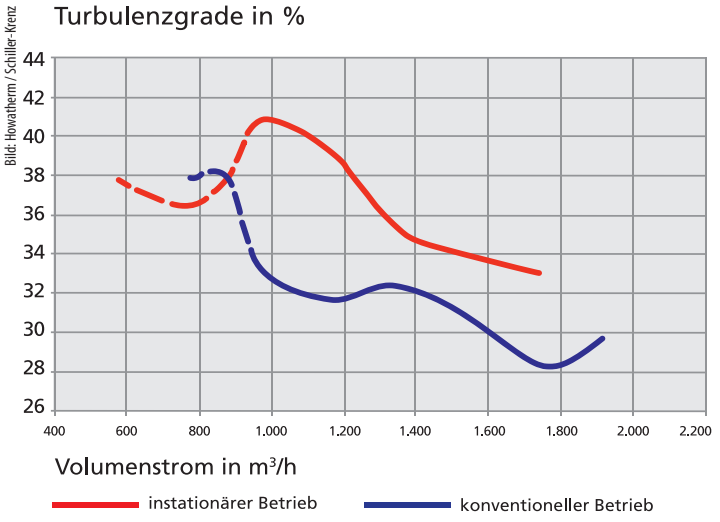


Bild: Howatherm / Schiller-Krenz

20 Turbulenzgrade in Abhängigkeit des Volumenstroms im Vergleich.

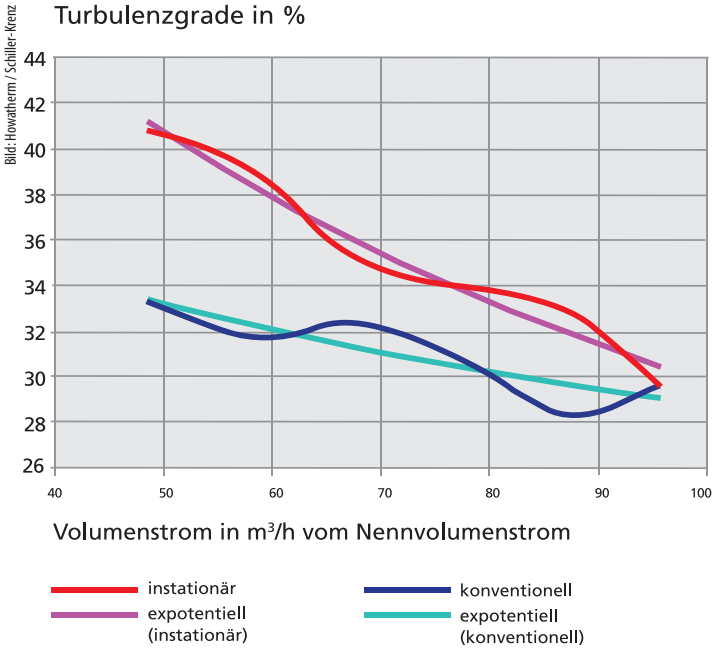


Bild: Howatherm / Schiller-Krenz

21 Turbulenzgrad in Abhängigkeit des Nennvolumenstromanteils im Vergleich.

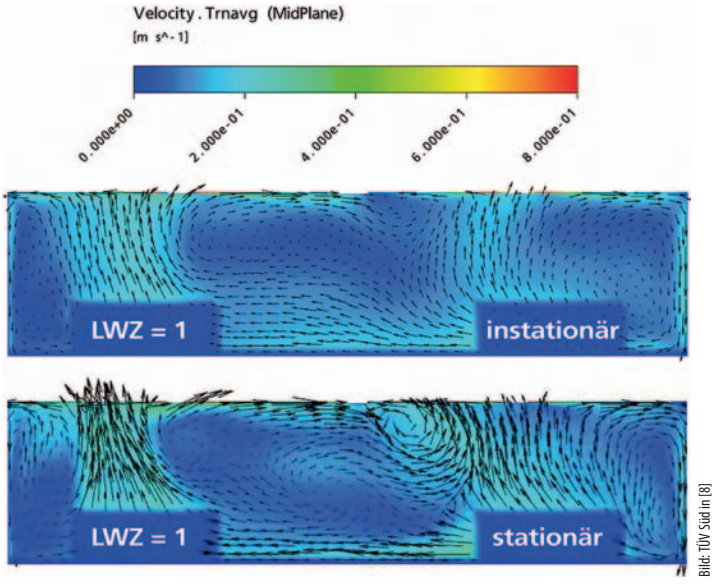


Bild: TÜV Süd in [8]

22 CFD-Untersuchung: Strömungsgeschwindigkeiten (vertikaler Schnitt) im Vergleich.

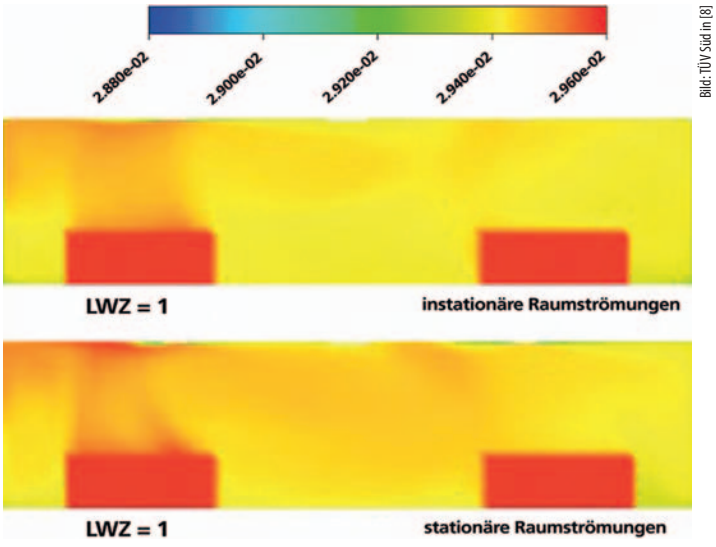


Bild: TÜV Süd in [8]

23 CFD-Untersuchung: Temperaturverteilung im Vergleich bei LWZ = 1 h^{-1}.

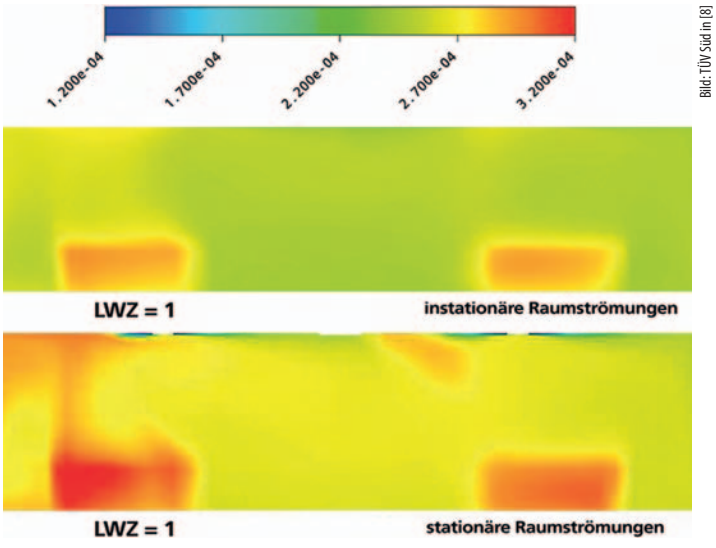
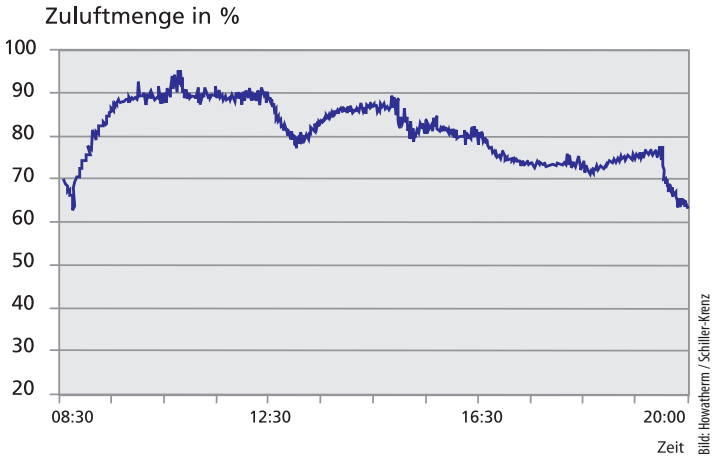
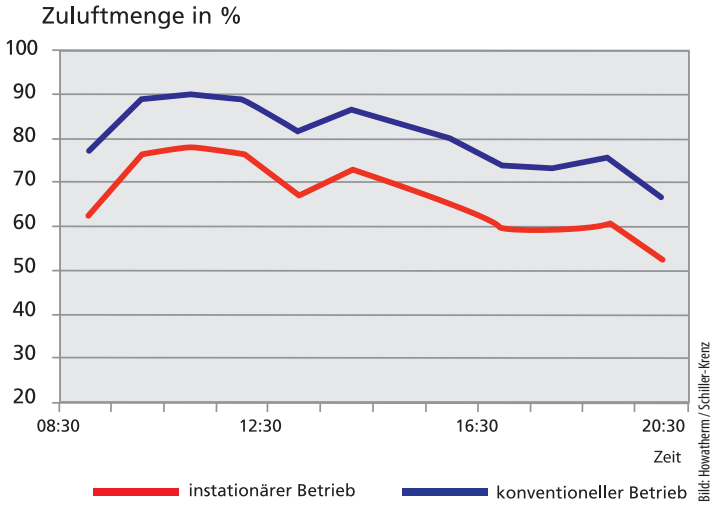


Bild: TÜV Süd in [8]

24 CFD-Untersuchung: Konzentrationsverteilung des CO_2-Tracerstoffs im Vergleich bei LWZ = 1 h^{-1}.



25 Typischer Luftmengenbedarf (Teillastverhalten) eines Hörsaals im Tagesverlauf.



26 Vergleich der benötigten Luftmengen (Teillastverhalten) eines Hörsaals im Tagesverlauf.

tisch bei gleicher Luftmenge auch gleiche Konzentrationen hätten einstellen müssen. Tatsächlich haben sich aber die mittleren Raumkonzentrationen im direkten Vergleich bei reduzierten Raumströmungsgeschwindigkeiten deutlich verringert.

Wenn nun keine erhöhten thermischen oder stofflichen Lasten abgeführt 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 23 toleriert werden.

Auswirkungen auf Praxis

25 zeigt am realen Beispiel eines Hörsaals 27 den typischen Verlauf der benötigten Luftmengen im Teillastbetrieb. Diese Raumlufttechnische Anlage wird über eine CO_2-geführte Luftmengenregelung betrieben. Es wurden Luftmengen zwischen 60 und 90 % während des Vorlesungsbetriebs an einem durchschnittlichen Referenztag benötigt. Ein Volllastbetriebszustand wurde nicht benötigt.

26 zeigt nun die effektive Änderung der benötigten Luftmengen bei instationärer Raumströmung im Vergleich zur konventionellen Raumlüftung. Durch die erreichte deutliche Luftmengenreduzierung kann die elektrische Leistungsaufnahme im Beispiel von durchschnittlich 2,67 auf 1,89 kW (– 29 %) gesenkt werden. Der Lüftungswärmebedarf reduziert sich ebenfalls von 24,9 auf 20,6 kW (– 17 %).

Durch das Verfahren verbessern sich hauptsächlich im Teillastbetrieb nicht nur die Lüftungseffektivität und die Durchmischung des Raumes, da durch die instationäre Raumströmung eine Art „Stoßbetrieb" erreicht und durch die impulsbehaftete Strömung eine höhere Induktion bewirkt wird, sondern es erhöht sich auch die Energieeffizienz. Stationäre Raumströmungen werden so verringert und es wird eine effektivere und homogenere Raumdurchströmung erzielt.

Fazit

Durch die intermittierende Be- und Entlüftung wird die Lüftungseffektivität – also die Durchmischung des Raumes – wesentlich verbessert. Bei den Strömungssimulationen, die durch den TÜV Süd unter Verwendung des alternierenden Verfahrens erstellt wurden, zeigte sich, dass durch die intermittierende Betriebsweise (Stoßbetrieb) der benötigte Luftwechsel wesentlich verringert werden konnte, da die Luftqualität durch die Impulslüftung erheblich verbessert wird. Zusätzlich verbessert sich hierdurch fühlbar die Behaglichkeit im Raum. Dies zeigen auch die Betrachtungen zu den Luftauslässen und deren Charakteristiken und insbesondere der messtechnische Nachweis im Labor.

All das wirkt sich letztendlich wirtschaftlich vorteilhaft bei der Dimensionierung der Anlagen aus, da hierdurch handfest Energie eingespart werden kann. Bei üblichen Teillastzuständen können im direkten Vergleich bis zu 40 % an Elektroenergie und bis zu 20 % an Lüftungswärme eingespart werden.

Bild: Howatherm

27 Anwendung des CrossXchange-Verfahrens zur intermittierenden und instationären Raumlüftung in einem Hörsaal der Fachhochschule Soest.

Literatur

[1] Rietschel: Raumklimatechnik Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik. Berlin: Springer (VDI-Buch), 2008
[2] Rietschel: Raumklimatechnik Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik. Berlin: Springer (VDI-Buch), 2008
[3] DIN EN ISO 7730 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, Mai 2006; DIN EN ISO 7730 Berichtigung 1, Juni 2007
[4] Kaup, C., Neues Verfahren zur Raumlufttechnik zur intermittierenden und instationären Raumlüftung. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, HLH, 3-2009
[5] Patent DE 10 2007 012 198.0 Raumlufttechnisches Gerät „Intermittierender Umschaltregenerator" und [4]
[6] Patent DE 10 2009 009 109.2 Raumlufttechnisches Verfahren „ Verfahren zur Belüftung eines Raumes"
[7] CFD Computational Fluid Dynamics durch den TÜV Süd 2008 / 2009.
[8] TÜV Süd: Untersuchungen verschiedener Varianten zur Hallenbelüftung mit dem 3D-Strömungssimulationsprogramm ANSYS CFX.