

# Höhere turbulente Durchmischung durch das UnoDuct-Luftdurchlasssystem

Christian Heschl, Fachhochschulstudiengänge Burgenland GmbH

## **Kurzfassung**

*Die bisher durchgeführten Untersuchungen über die Strahlausbreitung von Freistrahlen beschränken sich meist auf axialsymmetrische und zweidimensionale Luftdurchlässe. Darüber hinaus sind experimentelle Befunde von Strahlreihen bekannt. Mehrfachstrahlen in Form von Strahlreihen oder Schlitzauslässen wurden jedoch nur vereinzelt einer systematischen Untersuchung unterzogen. Mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation werden die dabei auftretenden turbulenten Austauschvorgänge diskutiert. Es wird gezeigt, dass mit dem Abstand benachbarter Luftdurchlässe der Geschwindigkeits- und Temperaturabbau sowie die turbulenten Austauschvorgänge wesentlich beeinflusst werden.*

## **Einleitung**

Die Hauptaufgabe einer raumluftechnischen Anlage ist es, die vom Nutzer geforderte Raumluftqualität sowie das geforderte thermische Raumklima sicherzustellen. Um diesen Anforderungen genügen zu können, ist es notwendig, bereits in der Planungsphase ein geeignetes Zuluftsystem auszuwählen und zu dimensionieren.

Soll eine mechanische Lüftung eingesetzt werden stehen die Verdrängungs-, Misch- und Quelllüftung zur Auswahl. In überwiegenden Fällen kommt das Mischlüftungskonzept, bei der die Zuluft mit hohem Impuls eingebracht wird, zum Einsatz. Um die Anforderungen des Nutzers hinsichtlich des thermischen Raumklimas einhalten zu können, dabei die Luftdurchlässe so konzipiert werden, dass eine rasche Geschwindigkeits- und Temperaturabnahme zwischen Zu- und Raumluft sichergestellt ist. Daher ist man bestrebt, eine hohe Durchmischung mit der Umgebungsluft zu gewährleisten. Wesentliche Einflussparameter stellen dabei die turbulenten Austauschvorgänge zwischen dem Zuluftstrahl und der Raumluft dar.

Experimentelle und numerische Untersuchungen zeigen, dass diese Austauschvorgänge wesentlich vom Turbulenzniveau und von der Strömungsgeschwindigkeit am Austritt des Luftdurchlasses abhängen [1, 2, 3]. Darüber hinaus sind raumbedingte Einflussgrößen wie Raumgeometrie, natürliche Konvektionsströmungen, Temperaturschichtungen usw. bekannt [4, 5]. Um bestmögliche Bedingungen für den Nutzer zu schaffen müssen Hersteller von Luftdurchlässen zum einen die turbulenten Austauschvorgänge optimieren und zum anderen entsprechende Auslegungsregeln zur gezielten Ausnutzung der raumbedingten Einflussgrößen dem Planer zur Verfügung stellen.

Der erfahrene Lüftungstechniker versucht daher besondere Strömungsphänomene wie z.B. den Coanda-Effekt zur Verbesserung der Strömungsverhältnisse in klimatisierten Räumen auszunutzen. Dieser beruht auf der Tatsache, dass am Strahlrand durch turbulente Austauschvorgänge von der Umgebung Luft mitgerissen wird (Entrainment). Kann aufgrund der Deckenpräsenz nicht genug Luft von der Umgebung nachströmen, entsteht ein Unterdruck, der den Strahl an die Decke ablenkt. Wird zusätzlich ein seitliches Ansaugen der Luft durch eine relativ lange und schlitzförmige Lufteinbringung behindert, kann dieser Effekt wesentlich verstärkt werden. Daher werden Schlitz- und Strahlreihenauslässe verstärkt eingesetzt.

Trotz Ausnutzung des Coanda-Effektes kommt es im Kühlfall oft zu einem Kaltlufteinbruch. Geschieht dies in der Aufenthaltszone, kann dies zu Zugerscheinungen und somit zur thermischen Unbehaglichkeit führen. Verursacht wird dieser unerwünschte Effekt durch den archimedischen Abtrieb. Dieser ist wesentlich von der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung (Raumlufitemperatur) und dem Strahlkern abhängig. Der Lüftungstechniker ist daher bestrebt diese Temperaturdifferenz möglichst rasch abzubauen.

In diesem Beitrag werden die Turbulenzparameter eines Strahlreihen- und Schlitzauslasses analysiert und deren Auswirkungen auf die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung diskutiert. Damit eine beliebige periodische Unterbrechung der Strahlreihen ermöglicht werden kann, basieren die Untersuchungen auf dem UNO-DUCT Düsenkanalsystem der Fa. Lufttechnik J. Pichler GmbH. Für die Untersuchung des Schlitzauslasses wurde ein konventionelles System herangezogen.

## ***Methodik***

Neben den klassischen Experimenten können numerische Simulationen (z.B. CFD – Computational Fluid Dynamics) den Zugang zu den erforderlichen Parametern ermöglichen. Beide Methoden weisen unterschiedliche Aussagefähigkeiten auf, stehen aber im engen Zusammenhang und ergänzen einander. Der Vorteil des numerischen Experiments, alle Informationen über alle wesentlichen physikalischen Größen im Raum bereitzustellen, wird durch den Verlust der Allgemeingültigkeit erkaufte. Inwieweit dieser Gültigkeitsverlust Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat, hängt von der Modellierung und den verwendeten numerischen Methoden ab.

Es ist daher notwendig die numerischen Ergebnisse durch experimentelle Befunde zu validieren. Um diesem Anspruch innerhalb der gegenständlichen Untersuchungen zu genügen, wurden umfangreiche Validationsrechnungen durchgeführt [6, 7]. Für die Berechnungen wurde der kommerzielle CFD-Code FLUENT 5.5 eingesetzt [9].

## Untersuchte Luftdurchlasssysteme

Es werden zwei Luftdurchlasssysteme, die eine Lufteinbringung über die gesamte Raumbreite ermöglichen, untersucht. Konkret werden die wesentlichen Strömungsparameter für einen konventionellen Schlitzauslass und dem UNO-DUCT Düsenkanalsystem ausgewertet und interpretiert.

Beim UNO-DUCT Düsenkanalsystem wird die Zuluft mit einem so genannten „Düsenkanal“ eingebracht. Dieser besteht aus einem Spiralfalzrohr in dem Düsenkörper formschlüssig eingearbeitet werden. Die Anordnung der Düsenkörper ist dabei beliebig. Aus Festigkeitsgründen ist der Mindestabstand der Düsenkörper mit  $s_d \geq 89\text{mm}$  in Axialrichtung und mit 30mm in Tangentialrichtung festgelegt. Jeder Düsenkörper umfasst sieben Bohrungen mit einem Durchmesser von ca. 8.6 mm. Dadurch entsteht eine Art Baukastensystem, das eine Vielzahl an Kombinationen ermöglicht und sehr leicht an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden kann.

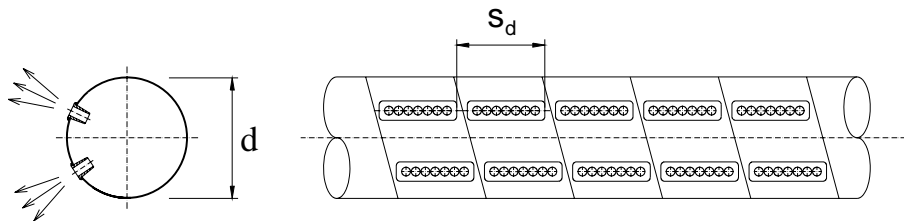


Abb. 1: Detail – Düsenkörper und UNO-Duct Düsenkanal

Durch die gleichzeitige Verwendung von Spiralfalzrohren als Träger- und Versorgungssystem ist es möglich, die Zuluft möglichst in allen Richtungen (diffus) austreten zu lassen. Die dabei erzeugten kleinen Einzelstrahlen erhöhen die insgesamt mitgerissene Sekundärluft bereits nach kurzem Abstand vom Luftdurchlass erheblich. Damit ist die Geschwindigkeit und Temperaturdifferenz der Zuluft gegenüber der Umgebung wesentlich schneller abgebaut als dies bei einem großen Einzelstrahl möglich ist.

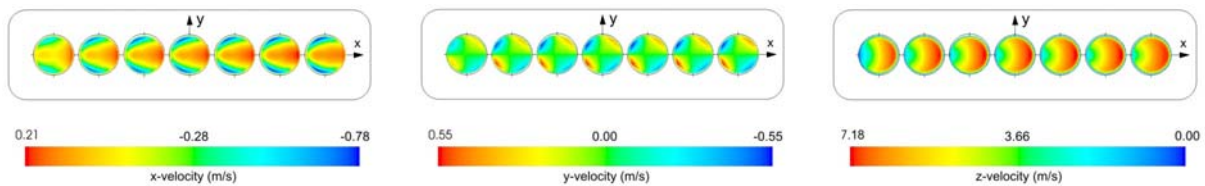
In der vorliegenden Arbeit beschränken sich die Untersuchungen auf in einer Reihe nebeneinander angeordneten Düsenelementen. Je nach Größe des Abstandes  $s_d$  ist auch bei dieser Anordnung eine höhere Induktion und somit ein schnellerer Temperatur- und Geschwindigkeitsabbau gegenüber konventioneller Schlitzauslässe zu erwarten. Um die Auswirkung der Einzelstrahlen auf die Strahlausbreitung untersuchen zu können wurden zwei Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Eintrittsrandbedingungen erstellt.

## Simulationsmodell

Das Berechnungsergebnis hängt wesentlich von den Eintrittsrandbedingungen, d.h. von den Ausströmverhältnissen des jeweiligen Luftdurchlasses, ab. Daher wurden gesonderte

numerische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung der Austrittszustände am UNO-DUCT Düsenkanalsystem durchgeführt.

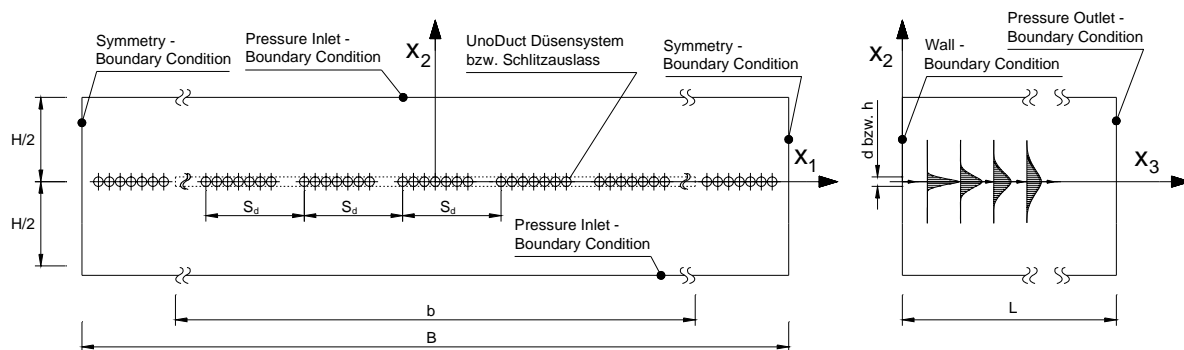
Dabei konnte gezeigt werden, dass die mittlere Austrittsgeschwindigkeit, Ausströmrichtung und die Turbulenzintensität mit dem Messergebnis sehr gut übereinstimmt. Darüber hinaus wurde durch die Umlenkung – ähnlich wie bei der Durchströmung von Rohrkrümmern – das Entstehen eines Doppelwirbels beobachtet. Demonstrativ für diese Untersuchungsergebnisse ist in Abb. 2 das Konturbild für die Geschwindigkeitskomponenten dargestellt.



**Abb. 2: Darstellung des Doppelwirbels am Uno-Duct Luftdurchlass ( $p_{\text{stat}}=20\text{Pa}$ ,  $u_{\text{Kanal}}=4\text{m/s}$ )**

Die notwendigen Eintrittsrandbedingungen für das Uno-Duct Düsenkanalsystem wurden aus diesen autarken numerischen Untersuchungen generiert. Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen wurde für die Bestimmung der Eintrittsrandbedingung des Schlitzdurchlasses die gleiche Verfahrensweise gewählt. Damit wurde die identische Erfüllung der Modellgleichungen im Eintrittsbereich sichergestellt.

Abb. 3 zeigt eine Prinzipdarstellung des verwendeten Simulationsmodells. Der Einlass besteht aus elf Düsenelementen mit jeweils sieben Bohrungen bzw. einem Schlitz mit der Breite  $b = 520\text{mm}$ . Die Bohrungsdurchmesser betragen  $d = 8.6\text{mm}$  und die Schlitzhöhe beträgt  $h = 8.6\text{mm}$ . Die Abmessungen des Berechnungsgebietes wurden mit  $L \times B \times H = 3.6 \times 0.979 \times 2.5\text{m}^3$  festgelegt.



**Abb. 3: Darstellung der verwendeten Randbedingungen innerhalb des Simulationsmodells**

Die gewählten geometrischen Abmessungen der Eintrittsöffnungen gewährleisten identische Flüsse, d.h. beide Luftdurchlasssysteme weisen dieselben Massen-, Impuls- und Energieströme im Eintrittsquerschnitt auf. Dadurch sind die wesentlichen Grundvoraussetzungen für einen objektiven Systemvergleich erfüllt.

## Diskussion der Ergebnisse

Um die Ergebnisse einer allgemeingültigen Interpretation zugänglich zu machen erfolgt die Darstellung der charakteristischen Größen dimensionslos. Aufgrund der dreidimensionalen Strömung erfolgt die Auswertung in der  $x_1 = 0$  Ebene (vgl. Abb. 3). Als Berechnungsgrundlage diente ein Düsenkörperabstand von  $s_d = 89\text{mm}$  und ein Schlitzabstand von  $B = 979\text{mm}$ .

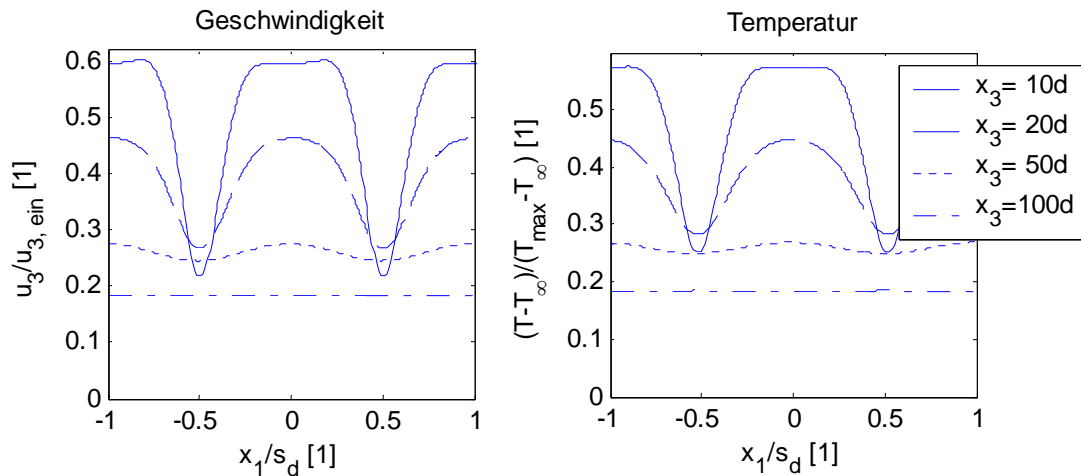


Abb. 4: mittlere Geschwindigkeits- und Temperaturprofile – Luftdurchlass UnoDuct

Nach dem Austreten des Strahles strömt die Umgebungsluft von oben und unten in Richtung der Strahlmittenebene zu. Bereits nach kurzer Entfernung hinter der Strahlaustrittsöffnung strömt die Umgebungsluft auch von den Seiten heran. Aufgrund des gewählten Modellierungssetups kann über die Symmetrieebenen keine Luft nachströmen, so dass sich stromabwärts ein quasi-ebener Freistrahler ausbildet. Wie schnell dieser Übergang von einem Mehrfachstrahl in einem Einzelstrahl erfolgt hängt vom Abstand zwischen den Durchlasselementen und von den turbulenten Austauschvorgängen ab.

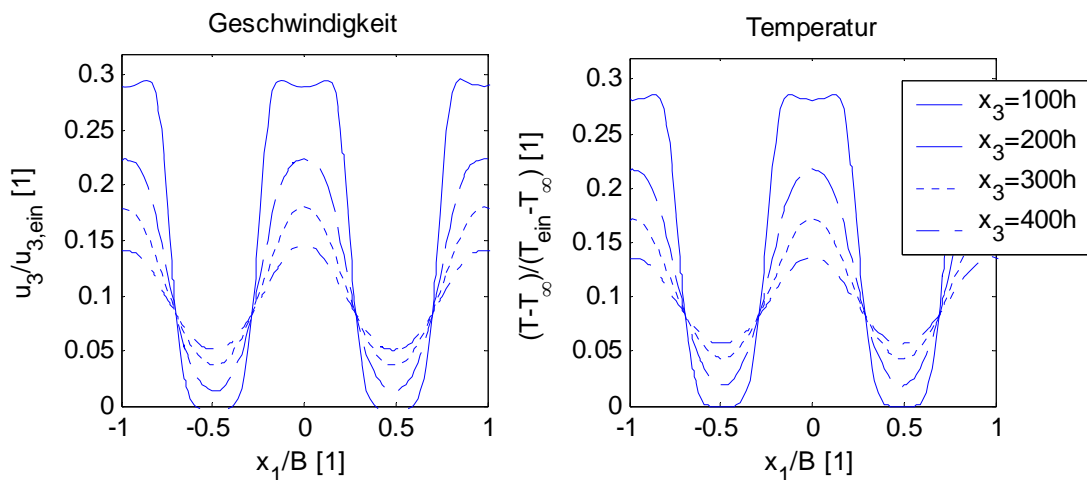
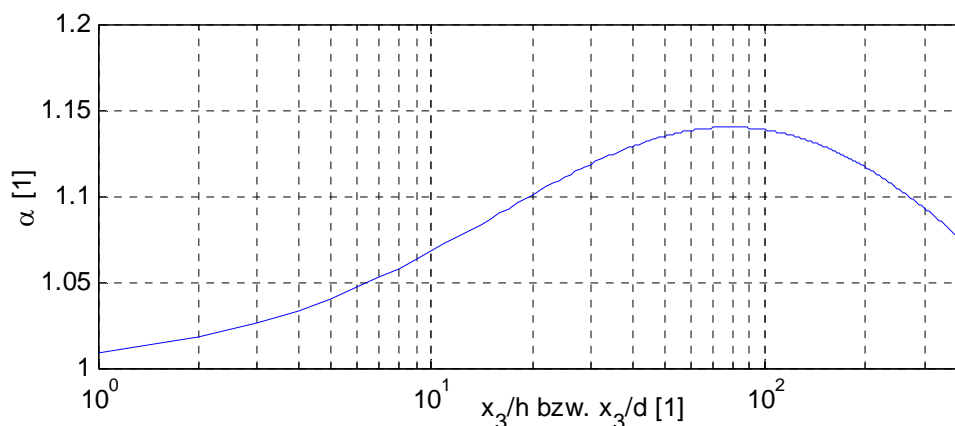


Abb. 5: Darstellung der verwendeten Randbedingungen innerhalb des Simulationsmodells

Abb. 4 und Abb. 5 zeigt die dimensionslosen mittleren Geschwindigkeiten sowie die mittleren Temperaturen in der  $x_2 = 0$  Ebene. Innerhalb einer Strahllänge von  $x_3 < 100d$  sind die Geschwindigkeitsgradienten beim UnoDuct-System deutlich zu erkennen. Diese erzeugen quer zur Hauptströmungsrichtung in der  $x_2 = 0$  Ebene einen zusätzlichen turbulenten Impuls- und Wärmeaustausch.

Auch beim Schlitzauslass sind in der  $x_2 = 0$  Ebene an den Seitenrändern turbulente Querbewegungen vorhanden. Aufgrund des größeren Abstandes zwischen den Durchlasselementen werden jedoch die periodischen Geschwindigkeitsspitzen wesentlich langsamer abgebaut. Dieses Verhalten beim Übergang von einem Mehrfachstrahl in einen Einzelstrahl war zu erwarten.

Um die globalen Auswirkungen der unterschiedlichen turbulenten Transportvorgänge analysieren zu können, ist in der Abb. 6 das Verhältnis zwischen den Volumenstrom am Eintritt und den innerhalb des Strahles mitgeführten Volumenstrom über die Lauflänge dargestellt.

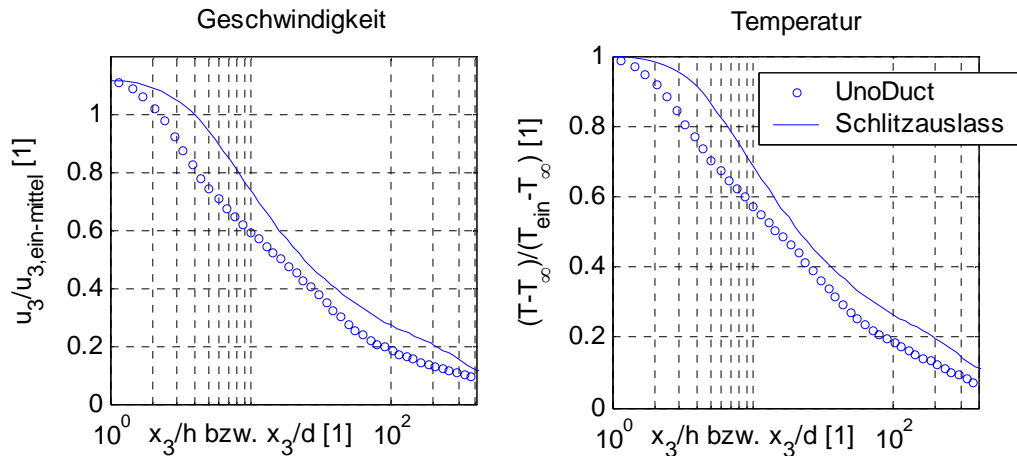


**Abb. 6: Verhältnis mitgeführter Volumenstrom**

Der Parameter  $\alpha$  ist dabei folgendermaßen definiert

$$\alpha = \frac{\dot{V}_{UnoDuct}(x_3)}{\dot{V}_{Schlitzauslass}(x_3)}. \quad (7)$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass im interessierenden Bereich (Strahllänge ca. 100 bis 400d) durch das UnoDuct Düsenkanalsystem bis zu 15% mehr Luft im Strahl mitgeführt wird. Mit größer werdendem Abstand wird das Verhältnis  $\alpha$  kleiner und nähert sich asymptotisch dem Wert 1. Dies kann damit begründet werden, dass sich nach einer bestimmten Lauflänge auch beim Schlitzdurchlass eine quasi-ebenen Freistrahlsströmung ausbildet.



**Abb. 7: Hauptstrahlachsenverlauf der mittleren Geschwindigkeit und Temperatur**

Aufgrund der höheren Durchmischung mit der Umgebungsluft und der schnelleren Ausbildung eines quasi-ebenen Freistrahls wird ein deutlich größerer Geschwindigkeits- und Temperaturabbau ermöglicht. Nach Abb. 7 ist innerhalb einer Strahllauflänge von 100 bis 400d mit einer um ca. 25% geringeren mittleren Geschwindigkeit und Temperatur auf der Hauptstrahlachse zu rechnen.

## **Zusammenfassung**

Die Art und Weise der Lufteinbringung hat einen wesentlichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit des Nutzers. Zur Sicherstellung der Anforderungen stehen dem Planer von Lüftungstechnischen Anlagen unterschiedlichste Luftdurchlasssysteme zur Verfügung. Speziell im Kühlfall werden oft Systeme verwendet, die eine optimale Ausnutzung des Coanda-Effektes sicherstellen. Neben Schlitzauslässen finden vermehrt Düsenkörper, die in einer Reihe nebeneinander angeordnet werden, Anwendung. Durch die einfache Konstruktion können diese Düsenelemente direkt in Spiralfalzrohre eingesetzt werden.

Im Gegensatz zu den Schlitzauslässen wird die Luft durch eine Vielzahl von Bohrungen dem Raum zugeführt. Nach dem Eintreten der Zuluft bilden sich kleine Einzelstrahlen aus, die eine quasi-zweidimensionale Betrachtung der Strömung in Austrittsnähe nicht zulässt. Zudem besitzen die nebeneinander angeordneten Düsenkörper aus Festigkeitsgründen einen Mindestabstand. Diese geometrischen Voraussetzungen führen unmittelbar nach dem Ausströmen zu relativ großen Geschwindigkeits- und Temperaturgradienten, deren Auswirkungen untersucht wurden.

Für die Untersuchung wurden numerische Methoden, die in anderen Arbeiten mit Messungen validiert wurden, herangezogen. Es wurden vergleichende Untersuchungen zwischen einem konventionellen Schlitzauslass und dem beschriebenen Luftdurchlasssystem UnoDuct der Fa. Lufttechnik J. Pichler GmbH durchgeführt. Es wurde dabei vorausgesetzt, dass die Schlitzhöhe mit den Bohrungsdurchmessern der Düsenkörper übereinstimmt. Um dabei die Beeinflussung der Turbulenzparameter eines Zuluftstrahls durch die geometrische Ausbildung

der Raumumschließungsflächen ausschließen zu können wurde eine Modellierung basierend auf Freistrahbedingungen durchgeführt, d.h. es kann genügend Luft von der Umgebung mitgerissen werden. Zudem wurde eine Strahlkrümmung aufgrund des archimedischen Auf- bzw. Abtriebes ausgeschlossen.

Beim UnoDuct Düsenystem erfolgt aufgrund des geringeren Abstandes zwischen den Luftdurchlässen der Übergang zum quasi-ebenen Freistrah wesentlich rascher als beim Fluss-adäquaten Mehrfachstrahl (identischen Massen-, Impuls- und Wärmestrom). Darüber hinaus wurden deutlich höhere turbulente Austauschvorgänge mit der Umgebungsluft im interessierenden Bereich (Strahllauflänge ca. 100 bis 400d) beobachtet. Es konnte gezeigt werden, dass der schnellere Übergang zu einem quasi-ebenen Freistrah und die größeren Turbulenzparameter zu einer besseren Luftdurchmischung führen.

Unter den beschriebenen Randbedingungen ist im Vergleich zum Fluss-adäquaten Mehrfachstrahl der relativ mitgeführte Volumenstrom beim UnoDuct Düsenkanalsystem bis zu 15% größer. Der Abbau der mittleren Geschwindigkeit und Temperaturdifferenz erfolgt auf der Hauptstrahlachse um ca. 25% schneller. Insbesondere im Kühlfall sind dadurch bessere Voraussetzungen für die Einhaltung des geforderten thermischen Raumklimas gegeben.



## **Literaturverzeichnis**

- [1] Hanel, B., Beitrag zur Berechnung von Freistrahlen mit erhöhter Anfangsturbulenz, *Luft- und Kältetechnik*, (1977), 63-67.
- [2] Hanel, B., Richter, E., Das Verhalten von Freistrahlen in verschiedenen Reynolds-Zahlenbereichen, *Luft- und Kältetechnik*, (1979), 12-17.
- [3] Regenscheit, B., Einfluss der Reynoldszahl auf die Geschwindigkeitsabnahme turbulenter Freistrahlen, *HLH 27*, (1976), 122-126.
- [4] Peng, S., Modelling of Turbulent Flow and Heat Transfer for Building Ventilation, *PhD-Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, (1998).
- [5] Zhang, G., Morsing, S., Bjerg, B., Sviidt, K., A Study on the characteristics of airflow in a full scale room with a slot wall inlet beneath the ceiling, *Proceedings of RoomVent'2000*, (2000), 199-204.
- [6] Heschl, H., Fesharaki, M., Raumluftrömungssimulation, *Internationaler Kongress e.nova.2001*, Pinkafeld, (2001).
- [7] Hanel, B., Die Berechnung der Mischungszone eines axialsymmetrischen turbulenten Freistrahls, *Luft- und Kältetechnik*, (1976), 193-197.
- [8] Heschl, H., Fesharaki, M., Steinkellner M., Validation der CFD-Analyse von Raumluftrömungen mittels Messungen, *Fluent Anwenderkonferenz*, Frankenthal, (2002).
- [9] FLUENT, FLUENT 5.0 User's Guide, *Fluent Inc. Centerra Resource Park*, Lebanon, (1998).

## **Nomenklatur**

$b$	Schlitzbreite [m]
$B$	Breite des Berechnungsgebietes [m]
$d$	Bohrungsdurchmesser, Kanaldurchmesser [m]
$h$	Schlitzhöhe [m]
$p_{stat}$	statischer Druck im Kanal [Pa]
$s_d$	Abstand zwischen zwei benachbarte Düsenelemente [m]
$t$	Zeit [s]
$T$	Temperatur [K]
$T_{ein}$	mittlere Temperatur am Eintritt [K]
$T_{max}$	maximale Temperatur in der betrachteten Ebene [K]
$T_{\infty}$	Umgebungstemperatur [K]
$u_i$	mittlere Geschwindigkeit in x, y bzw. z-Richtung ( $i = 1,2$ bzw. 3) [m/s]
$u_{i,ein}$	mittlere Geschwindigkeit am Eintritt [m/s]
$u_{i,max}$	maximale Geschwindigkeit in der betrachteten Ebene [m/s]
$x_i$	Koordinatenrichtung x, y bzw. z-Richtung ( $i = 1,2$ bzw. 3) [m]
$\alpha$	Parameter – Volumenstromverhältnis [1]