

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Band:** 114 (1996)  
**Heft:** 37

**Artikel:** Detaillierte Raumluftrömungsberechnung  
**Autor:** Schälin, Alois  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-79032>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

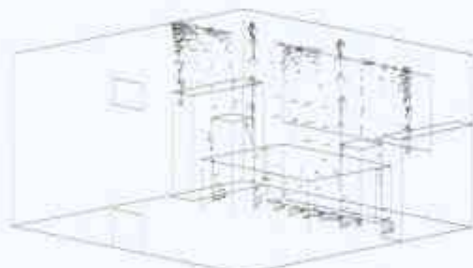
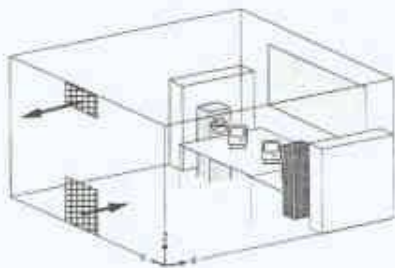
**Download PDF:** 24.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Alois Schälin, Zürich

## Detaillierte Raumlufströmungsberechnung

Die numerische Strömungsberechnung erlaubt die detaillierte Untersuchung der Strömungsvorgänge und der Verteilungen von Temperaturen und Schadstoffen in Gebäuden und Umgebung. Ungezählte Anwendungen sind möglich und werden zunehmend vor allem in der Lüftungsplanung zur Zufriedenstellung von Raumbenutzern, aber auch in Umwelt- und Sicherheitsfragen bei der Ausbreitung von Schadstoffen oder Rauch genutzt. Der Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Methode und ihre Möglichkeiten für die Ingenieurpraxis und zeigt vor allem den Einsatz und die Vorteile anhand der Beispiele eines Büroraums, eines Atriums und eines Konzertsaals.



Die numerische Strömungsberechnung (häufig CFD genannt, «Computational Fluid Dynamics») hat in den letzten zehn Jahren mit der stark wachsenden Rechnerleistung auch in der Lüftungsplanung für Räume und Gebäude Einzug gehalten. Dank der Forschungs- und Entwicklungsarbeit der letzten Jahre, auch unter Mitwirkung des Autors dieses Beitrags an der ETH Zürich, hat die Methode einen Stand erreicht, der den Einsatz als wichtiges Designhilfsmittel in der Lüftungs- und Haustechnik ermöglicht.

Durch den Einsatz der Strömungsberechnung können in verbreiteten Anwendungen wie Büroräumen oder Schulzimmern nachteilige oder überdimensionierte Auslegungen (um sicher auf der «guten» Seite zu liegen) vermieden und damit Investitions-, Sanierungs- und Betriebskosten reduziert werden. Vor allem in neuen oder seltenen Anwendungen, wie Lüftung in Stadien, Hallen oder Atrien, können die auftretenden Strömungsprobleme ohne detaillierte Strömungsrechnung kaum abgeschätzt werden. Während die besser bekannten Zonenmodelle meist nur einen einzigen Rechenpunkt in einem Raum unter der Annahme kompletter Mischung ansetzen, werden in der detaillierten Strömungsrechnung die Werte der interessierenden Grössen an sehr vielen Raumpunkten berechnet.

Die besondere Stärke der Methode liegt in der Bestimmung der lokalen Ver-

teilung von Geschwindigkeiten, Temperaturen oder Zusatzstoffen in einem Raum. Die folgenden Fragestellungen aus der Praxis sollen einen Eindruck geben, wozu die Strömungsrechnung hilfreich sein kann.

- Zieht es dem Bürobenutzer am Kopf aufgrund der Lüftungsanordnung?
- Wird der Rauch der Raucher im Büro oder Restaurant verteilt oder abgesogen?
- Bekommen die Bürobenutzer kalte Füsse wegen einer starken Temperaturschichtung?
- Ist ein Luftvorhang energetisch oder komfortmässig ungünstiger als eine Drehtüre?
- Habe ich einen Kaltluftabsturz an der Glasfassade eines Atriums zu befürchten?
- Kommen die Theaterbesucher ins Schwitzen oder können sie die Vorstellung geniessen?
- Werden Schadstoffe gut abgesogen oder sind die Arbeiter gefährdet?

### Die Methode in Kürze

Die wesentlichen Schritte der numerischen Strömungsberechnung sind die folgenden:

- Prinzipiell unterteilt man das Gebiet, das untersucht wird, in sehr viele (1000 bis eine Mio.) Rechenzellen und stellt die bestim-

1  
Beispiel Büro: Berechnung der Raumlufströmung, Temperatur- und Schadstoffverteilung nach Lüftungssystem und Wärmequellen. Bilder unten: Schadstoffverteilung bei Mischlüftung (links) und Quelllüftung (rechts). Weiss: hohe Konzentration

menden Differentialgleichungen für die Strömung in allen diesen Zellen mit Anfangs- und Randbedingungen auf.

Die Differentialgleichungen werden in mehreren Schritten, meist durch Integration über die Rechenzellen (Verfahren der finiten Volumina), auf ein System von algebraischen linearen Gleichungen reduziert und mit den soweit bekannten Werten für die Koeffizienten gelöst.

Schritt 2 wird in mehrfach verschachtelten Iterationen bis zum Erreichen der «richtigen» Lösung im ganzen Gebiet wiederholt.

Die Strömung wird durch folgende Grundgleichungen (Transportgleichungen) bestimmt:

- Massenkontinuität (Erhaltungssatz der Masse)
- Impulssatz (Newton'sches Bewegungsgesetz «Kraft = Masse  $\times$  Beschleunigung»)
- Energiesatz (Energieerhaltung)

In diese Grundgleichungen müssen die für die Raumlufströmungen relevanten physikalischen Mechanismen inte-

griert werden: Auftrieb, Wärmestrahlung, Wärmespeicherung und Wärmeleitung in angrenzenden festen Materialien. Hinzu kommen je nach Anwendung zusätzliche Gleichungen für die Konzentrationen von Zusatzstoffen wie  $\text{CO}_2$ , Rauch usw., sowie für die turbulente kinetische Energie, die eine Hilfsgrösse zur Erfassung des turbulenten Charakters der Strömung ist. Für eine detailliertere Beschreibung sei auf die Literatur verwiesen [1, 2, 3].

Aus den direkten Resultaten der Strömungsrechnungen können weiter z.B. die Wärme- und Luftzugskomfortgrössen [4, 5] und die empfundene Raumluftqualität (olf/depol) für geruchlich wahrnehmbare Stoffe nach Fanger [6] im ganzen Raum abgeleitet werden.

### Aufwand

Der für eine solche Berechnung notwendige Aufwand unterteilt sich in den Arbeitsaufwand zum Aufsetzen des Falls (Vereinfachungen der Realität für die Geometrie und die Randbedingungen) und in

den Rechenzeitaufwand. Gerade in der Wahl der notwendigen und hinreichenden Vereinfachungen der Realität liegt ein entscheidender Teil des Know-hows des Ingenieurs.

Ein grosser Arbeitsanteil liegt in der Rechengittererzeugung, d.h. dem Definieren der Geometrie und dem anschliessenden optimalen Verteilen der zur Verfügung stehenden Rechenzellen auf diese Geometrie. Das Vorgehen ist ähnlich dem von der Strukturmechanik bekannten Verfahren der finiten Elemente. Bild 2 zeigt als Beispiel das Rechengitter auf der Berandung des Atriums. Die Umsetzung ins Programm wird mitbestimmt durch die Bedienungsfreundlichkeit des verwendeten Programms. Heute gibt es Programme, deren Programminput für eine einfache Geometrie von einem versierten Ingenieur in wenigen Stunden erledigt werden kann.

Die heutigen Rechner werden immer schneller und erlauben eine vernünftige Rücklaufzeit für ein Rechenergebnis in einer genügend detaillierten Auflösung für die Untersuchung eines Falles. Für einen einfachen Büroraum mögen 10-30 000 Zel-

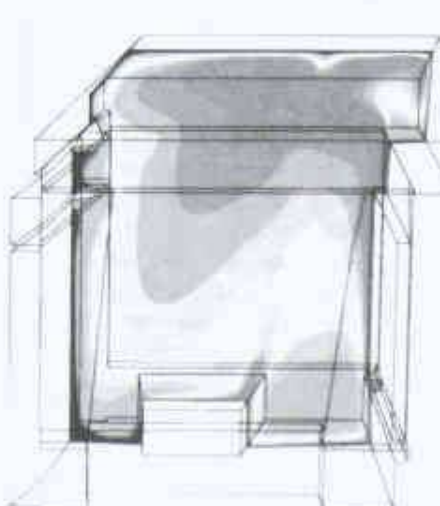
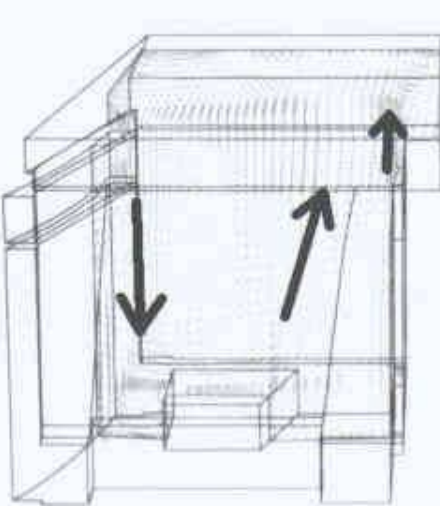
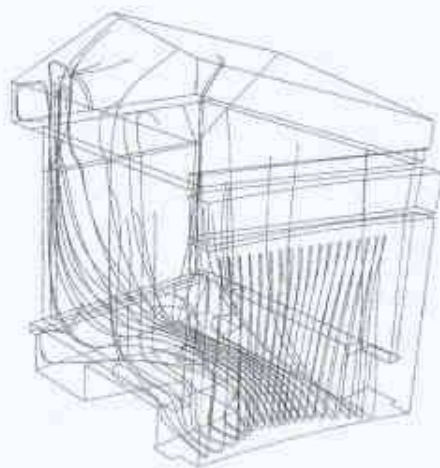
len mit einem einfachen Rechengitter genügen, für eine Sporthalle oder ein Auditorium mit detaillierter Geometrie sind mindestens 100 000 Rechenzellen anzusetzen. Für einen solchen detaillierten Fall ist dann auf einem Rechner der neuesten Generation etwa ein Tag Rechenzeit pro untersuchte Variante einzusetzen. In ganz einfachen Fällen kann man aber auch schon nützliche Resultate mit 1000 Rechenpunkten bei einer Rechenzeit von einer Stunde auf einem Pentium-PC erhalten.

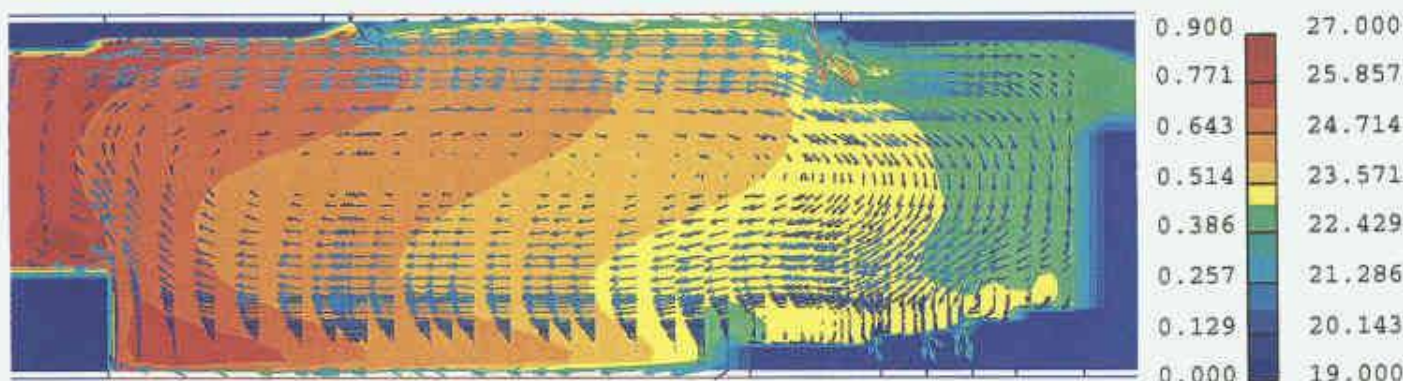
Der Aufwand lohnt sich aber in den meisten Fällen, da Alternativen zu solchen Rechnungen entweder Abschätzungen

2

Atrium Grafenau: Oben links: Aussenansicht des Bürogebäudes mit Atriumfront und -dach. Mitte: Atriumgeometrie mit Rechengitter. Rechts: Weg masseloser Partikel, die auf 15 m Höhe zur Simulation einer Wintersituation losgelassen wurden, Reisedauer: rund 2,5 Min.

Unten links: Innenansicht Atrium (im Bau). Mitte: Luftströmung in einem Schnitt durch das Atrium, die Pfeile geben die Strömungsrichtung an. Rechts: Temperaturverteilung im selben Schnitt





mit empirischen Formeln, die jedoch meistens aus vereinfachten Betrachtungen gewonnen wurden und nicht allgemein anwendbar sind, oder experimentelle Versuche in Versuchsräumen unter kontrollierten Bedingungen sind, die viel Zeit und Geld kosten. Jede experimentelle Variante braucht fast den gleichen Aufwand; eine zusätzliche Rechenvariante zu einer vorhandenen Grundgeometrie ist hingegen mit wenig zusätzlichem Arbeitsaufwand verbunden (einige Stunden).

Die heute erhältlichen Programme erlauben mit den berücksichtigten physikalischen Modellen und Effekten eine sehr gute qualitative Aussage über die Strömung (besonders im Variantenvergleich), aber auch eine gute quantitative Aussage (innerhalb 10–20% auf Geschwindigkeiten). Abweichungen auf verschiedenen Stufen von der Realität können mit Erfahrung abgeschätzt und durch richtiges Vorgehen reduziert werden:

- |              |  |
|--------------|--|
| physikalisch | Ungenügende Modelle (dies kann für genaue Berechnungen im Bereich der Turbulenzmodellierung ein Problem sein)  |
| numerisch    | Ungenaueres numerisches Verfahren (Fehler im Prozentbereich).<br>Zu wenig gut konvergierte Lösung wegen falscher Parameterwahl (bei fehlender Erfahrung) |
| Hardware     | Zu geringe Rechenaufösung in wichtigen Gebieten, evtl. aus Kosten/Nutzen-Überlegungen  |
| Modellierung | Ungeschickte Vereinfachung der realen Situation (bei fehlender Erfahrung).<br>Ungenügende Kenntnis der Randbedingungen oder/und falsche Annahmen         |

In den meisten Fällen sind die grössten Unsicherheiten in den Resultaten auf eine ungenügende Kenntnis der Randbedingungen und nicht auf Modellierungsprobleme zurückzuführen.

3  
Tonhalle Zürich, Konzertsaal sowie Temperatur- und Strömungsverteilung des alten Lüftungssystems (2D-Modell). Linke Skala: Strömungsgeschwindigkeit in m/s, rechte Skala: Temperaturverteilung in °C



### Anwendung im Ingenieur-Alltag

Zwei Haupthindernisse für eine Verbreitung der CFD-Methode in der Ingenieurpraxis sind heute überwunden:

- schwer verständliche oder kompliziert zu handhabende Programme. Einige der heutigen Programme sind nach kurzer Einführung relativ leicht zu bedienen
- nicht vorhandene oder viel zu teure Computerressourcen. Gewisse Programme laufen befriedigend schnell auf heutigen PCs

Die Erfahrung in der Wahl der Vereinfachungen und der notwendigen Para-

meter muss hingegen zu einem grossen Teil immer noch selber erarbeitet werden; dies können die Programme (noch) nicht bieten. Der Ingenieur kann sich allerdings mit der Unterstützung der heutigen Programme auf wesentliche Fragen konzentrieren, wie vor allem auf die Vereinfachung der realen Situation und die Beurteilung der möglichen Fehlerquellen. Vor der selbständigen Anwendung sollte aber eine Ausbildungs- und Übungszeit (Praxis mit Unterstützung) von zwei bis drei Monaten angesetzt und die Methode danach zu mindestens einem Drittel der Zeit angewendet werden. Von einem nur gelegentlichen Gebrauch ist abzuraten.

Leistungsfähige und für viele Anwendungsfragen taugliche Rechner sind für unter 10 000 Franken erhältlich und relativ leicht bedienbare Programme ab rund 20 000 Franken. Der Software-Preis liegt in einer Grösse, die nur für häufige Benutzer in Frage kommt. Für eine gelegentliche Anwendung im Ingenieur-Alltag ist eine Auftragsrechnung sinnvoll, wobei der Gesamtarbeitsaufwand von der Geometrie und der Anzahl zu untersuchender Varianten abhängt.

### Fallstudien in der Schweiz

Die nachfolgenden Beispiele, die zumeist am Laboratorium für Energiesysteme der ETH Zürich untersucht wurden, illustrieren die Strömungsberechnung in Anwendungen, teilweise im Rahmen des internationalen IEA-ECB-Forschungsprojektes Annex 26 «Energieeffiziente Lüftung von grossen Räumen» unter der Leitung von Dr. A. Moser. Die Beispiele stehen stellvertretend für sehr verschiedene Anwendungen aus einer grossen Palette wie Wohnräume, Klein- und Grossraumbüros, Sport-, Konzert- und Fabrikhallen, Auditorien, Atrien, Gebäude-Aussenumströmungen und andere.

### Büroräume

Büroräume sind ausführlich im Rahmen des nationalen ERL-Forschungsprogramms behandelt worden [1]. Dabei wurden vor allem die Luftströmungen mit den Auswirkungen auf den Komfort der Bürobewohner und die Verteilung von verschiedenen Schadstoffen von Quellen wie Zigarettenrauch oder Teppichen für verschiedene Geometrien und Lüftungssysteme behandelt. Bild 1 zeigt eine besonders eindrückliche Gegenüberstellung der Wirksamkeiten eines Misch- und eines Quell-Lüftungssystems für ein identisches Zweipersonenbüro von 20 m<sup>2</sup> Grundfläche mit je zwei Personen und Computern als Wärmelast. Die gesamte an die Luft anfallende Wärmelast beträgt 550 W und entspricht im vorliegenden Fall einer Flächenbelastung von 27 W/m<sup>2</sup>. Es wurden keine Kühldecken eingesetzt und entsprechend dem hohen Lastäquivalenz von 125 m<sup>3</sup> pro Stunde und Person ein Luftwechsel von 5 h<sup>-1</sup> gefahren.

Diese Werte gelten für beide Lüftungssysteme; beim Mischlüftungssystem betrug die Zulufttemperatur 17°C und beim Quelllüftungssystem 19°C. Das Bild oben rechts (Bild 1) zeigt die Auftriebsströmung über den Wärmequellen Mensch und Computer. Auf den beiden unteren Bildern ist die Schadstoffverteilung aufgrund der identischen Quelle,

nämlich eines Rauchers, ersichtlich. Die Einheit ist hier relativ zueinander zu verstehen, in unmittelbarer Nähe des Rauchers beispielsweise sind in beiden Fällen die Schadstoffkonzentrationen >5. Beim Mischlüftungssystem (Bild unten links) ist die Konzentration beim Nichtraucher auf der anderen Tischseite wegen der Durchmischung immer noch >2, während sie beim Quelllüftungssystem (Bild unten rechts) noch höchstens 0,2 beträgt. Die Quelllüftung führt bei geeigneter Auslegung zu einem wirksamen Abtransport der Schadstoffe in Gebiete ohne Auswirkungen auf den Benutzer, nämlich in Deckennähe, wo auch der Abzug plaziert ist.

### Atrium Grafenau Zug

Eines der drei Atrien im Bürogebäude Grafenau Zug wurde im Rahmen des internationalen IEA-Projektes Annex-26 besonders detailliert mit Messungen und Berechnungen untersucht [7]. Im Atriuminnenraum sind auf dem Grundgeschoss weitere Innengebäude plaziert, das markante davon ist eine Cafeteria. Im Winter interessierte besonders die Frage des Kaltluftabfalls entlang der Glasfassade. Der zusammenhängende Glasteil der Fassade ist 15 m hoch, die Firsthöhe des Atriums 26 m. Bild 2 zeigt Ansichten des Atriums, einen Teil des Rechenmodells und der Resultate in einem Querschnitt. Bei Aussentemperaturen um -2°C beträgt die Lufttemperatur im Atrium recht homogen etwa 12°C (ohne Zusatzheizung im Atrium). Die vorhandene Schichtung im Winter ist minim (weniger als ein Grad Differenz über die ganze Höhe). Die Luft strömt mit Geschwindigkeiten unter 0,5 m/s der Fassade entlang nach unten, breitet sich am Boden nach hinten aus und steigt den Bürofassaden entlang wieder nach oben. Die gemessenen Geschwindigkeiten dem Boden entlang vor der Fassade, also im Aufenthaltsbereich von Personen, liegen bei 0,3–0,4 m/s im Fussbereich und bei 0,1–0,2 m/s auf einem Meter Höhe. Dieselben Werte ergeben sich auch aus der numerischen Berechnung und bestätigen die Brauchbarkeit der Methode für solche Anwendungen.

### Theater

Theater stellen ähnliche Anforderungen an Temperatur und Komfort wie Hörsäle. Erschwerend kommen hier die grosse Höhe und je nach Kompliziertheit der Geometrie die Gefahr von toten Zonen ohne Frischluft und hohen Temperaturen bei unausgewogener oder zentraler Luftverteilung hinzu. Bild 3 zeigt die Tonhalle Zürich und die Temperaturverteilung in einem Längsschnitt bei der vorhandenen

### Literatur

- [1] Schülkin A., Chen Q., Moser A., Suter P.: Raumströmungsalltag - Ein Katalog von Strömungsberechnungen in Büroräumen. ERL-Publikationsreihe, Band 4, VSHL, 1994
- [2] Dorer F., Moser A., Schülkin A.: Rechenprogramme zur Bestimmung der Luftströmungen in Gebäuden. ERL-Publikationsreihe, Band 5, VSHL, 1994
- [3] Schülkin A.: Berechnung von Luftströmungen in Räumen - Möglichkeiten für die Praxis. SIA, Nr. 50, 1046–1050, 1994
- [4] Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J.: Turbulence and draft: the turbulence of airflow has a significant impact on the sensation of draft. ASHRAE J., Vol. 31, No. 7, p. 18–23, 1989
- [5] SIA-Norm 180. Wärmeschutz im Hochbau. Ausgabe 1988
- [6] Fanger P.O.: The new equation for indoor air quality. Proceedings of IAQ 1989, ASHRAE, San Diego, p. 251–254, 1990
- [7] Schülkin A., Aiulfi D., Van der Maas J.: Application of Air Flow Models to Atria. Proceedings of RoomVent 96, July 15–17, Yokohama, Japan, 1996

(alten) Luftführung mit Zuluft vor allem im Deckenbereich. In einer Studentenarbeit wurden im Rahmen der Ausbildung an der ETH Zürich verschiedene Lösungsvorschläge miteinander verglichen. Während die Musiker auf der Bühne (rechts im Bild) frische, aufgrund der direkten Belüftung teilweise sogar fast kühle Verhältnisse haben, wird es vor allem den Zuschauern in den hinteren Rängen zu warm, weil bei ihnen nur noch vorgeheizte Luft eintrifft.

### Schluss

In all diesen ganz unterschiedlichen Anwendungen kann die Strömungsberechnung eine wichtige unterstützende Rolle in der Lüftungsplanung erfüllen. Über diese fast «klassischen» eigentlichen Lüftungsfragen hinaus kann sie aber auch in verwandten Gebieten eingesetzt werden, wie z.B. in Fragen der Aussenumströmung von ganzen Gebäuden oder der Rauchausbreitung in Räumen und Gebäuden im Brandfall und zur Erarbeitung von Sicherheitskonzepten in Notfällen.

Adresse des Verfassers:

Abis Schülkin, dipl. phys. ETH, Dr. sc. nat., Air Flow Consulting, Löwenstr. 42, 8001 Zürich