

Klaus Döge
Angelika Ehle

Zur Berechnung der nichtisothermen Strömung und der Konzentrationsfelder in Räumen mit Abzügen

Computerprogramme zur Berechnung der nichtisothermen Raumluftströmung haben sich in den vergangenen Jahren zunehmend zu ausreichend genauen und effektiven Werkzeugen für die Lösung unkonventioneller und schwieriger Aufgaben in der Klimatechnik entwickelt. Im Vordergrund der folgenden Ausführungen steht das Aufzeigen der Möglichkeiten, die sich aus der zusätzlichen numerischen Berechnung des konvektiven Stoffübergangs ergeben. An verschiedenen einfachen Beispielen von Labors mit Abzügen wird das Verständnis über das Zusammenwirken von Raum und Abzug hinsichtlich des konvektiven Wärme- und Schadstofftransportes vertieft. Darauf aufbauend können für beliebige Räume und Randbedingungen die optimale Anordnung der Abzüge, der Luftein- und -austrittsquerschnitte usw. ermittelt werden.

Zur Sicherung der thermischen Behaglichkeit in großen Räumen, zur Funktionserfüllung von Kühlhäusern und bei vielen anderen Anwendungen hat sich die Verwendung von Computerprogrammen zur Berechnung der nichtisothermen Raumströmung bewährt [1, 2]. Weniger verbreitet, aber nicht minder wichtig ist die numerische Berechnung der Konzentrationsfelder in schadstoffbelasteten Räumen, z. B. in Laboratorien mit Abzügen, wie sie auch in der Kältetechnik genutzt werden. Für die klimatische Ausgestaltung solcher Laboratorien und Abzüge gibt es viele Normen [3, 4] und Richtlinien.

So fordert die DIN 1946 Teil 7 [3], daß „bei Anreicherung von Schadstoffen in gefahrdrohender Menge am Boden oder im Bereich der Decke eine wirksame Absaugung vorhanden sein muß“. Empfohlen wird, die Wärmelasten und Schadstoffe auf kürzestem Wege aus dem Raum abzuführen. Ob diese und andere Hinweise über eine vorteilhafte Luftführung im Raum ausreichen, die gestellten Anforderungen zu erfüllen, kann im Vorfeld meist nicht genau abgeschätzt werden. Besonders unsicher sind solche Voraussagen bei instationären Strömungen und wenn die Schadstofflasten mit großen Heiz- oder Kühllasten kombiniert auftreten, weil sich in diesen Fällen schwer voraussehbare, zeitveränderliche thermisch angetriebene Strömungen einstellen können. Abhilfe ist hierbei durch die Einhaltung und Regelung vorgegebener und relativ großer Zu- und Abluftvolumenströme [3, 4] möglich, die die Raumluftströmung bestimmen. Die Sicherung der thermischen Behaglichkeit ist dabei vorausgesetzt.

Zum Nachweis der Funktion der Abzüge und einer geringen Schadstoffkonzentration in Laboratorien verwendet man die Tracergas-Meßtechnik [5]. Da-

Calculation of non isothermal air flow and at the concentration paterne in rooms with hoods

Computer programmes for the calculation of non isothermal air flow in rooms have been developed in the last years as reasonable precise and effective tools for non conventional and difficult tasks in air conditioning technology. This paper shows possibilities based on the additional numerical calculation of the convective mass transfer. Several simple examples describe the influence of the hood and the room air flow on the convective heat and mass transfer. Based on this knowledge the optimal arrangement of the hoods, the air outlets and the air inlets can be determined.

Keywords: non isothermal room air flow, concentration paterne, hoods, simulation, computer programm ResCUE

mit ist es möglich, an ausgeführten Anlagen für einzelne Raumpunkte die zeitliche Veränderung der Konzentration des vorher zugegebenen Tracergases mit guter Genauigkeit zu messen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht darin, daß im Interesse der Einordnung der gewonnenen Ergebnisse zusätzlich die thermischen Randbedingungen bekannt sein müßten. In vielen Fällen ist außerdem die Messung der Konzentration an verschiedenen Stellen im Raum wünschenswert.

Im weiteren soll an einigen Berechnungsbeispielen gezeigt werden, daß die numerische Berechnung der nichtisothermen Raumluftströmung einschließlich der Konzentrationsfelder eine flexible und effektive Methode zur Lösung von Aufgaben zum konvektiven Schadstofftransport geworden ist. Dazu wird wie bei früheren Arbeiten [1, 2] das im Lehrgebiet Thermofluidynamik der TU Dresden entwickelte Programm ResCUE eingesetzt.

Dr.-Ing. K. Döge, Dipl.-Math. A. Ehle, Institut für Luft- und Kältetechnik gem. GmbH, Dresden

1. Zu einigen thermofluid-dynamischen und mathematisch-numerischen Grundlagen und zu den Genauigkeitsaussichten bei der Verwendung des Computerprogramms ResCUE

Für die fachgerechte Nutzung der verschiedenen Computerprogramme zur Raumluftströmungsberechnung sind spezielle Kenntnisse zum konvektiven Wärme- und Stofftransport und deren mathematisch-numerischen Grundlagen erforderlich. Wegen des großen Umfangs solcher Ausführungen wird im weiteren darauf nicht eingegangen, sondern auf die Literatur [6-8] verwiesen.

Zur Beschreibung der dreidimensionalen, instationären und nichtisothermen Raumluftströmung wird ein System partieller Differentialgleichungen, bestehend aus der Grundgleichung der Strömungsmechanik (Impulstransportgleichung), der Kontinuitätsgleichung, der Wärmetransportgleichung und der Stofftransportgleichung verwendet. Die thermischen Auftriebseffekte können bei den in Räumen auftretenden Temperaturdifferenzen mit Hilfe des Volumenausdehnungskoeffizienten angenähert werden (*Boussinesq*-Vereinfachung).

Die verwendete Stofftransportgleichung (*Reynolds*-Gleichung für den turbulenten Stofftransport) gilt für den Sonderfall kleiner Masseanteile (Massekonzentration m_α des Schadgases (Komponente α) in der Luft (Komponente β) eines binären Gemisches. Außerdem sind eine Beeinflussung des Geschwindigkeitsfeldes durch das Schadgas und die Existenz von Quellen ausgeschlossen.

$$\frac{\partial \overline{m_\alpha}}{\partial t} + v_j \frac{\partial \overline{m_\alpha}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((D + D_t) \frac{\partial \overline{m_\alpha}}{\partial x_j} \right)$$

$$\overline{m_\alpha} = \frac{\rho_\alpha}{\rho} \quad \overline{\rho_\alpha} = c$$

Der turbulente Diffusionskoeffizient D_t wird bestimmt aus der turbulenten *Schmidt*-Zahl

$$Sc_t = \frac{\eta_t}{\rho D_t} \text{ mit } 0,7 < Sc_t < 1,0.$$

Ergänzt werden diese Gleichungen beim verwendeten *k-ε*-Modell zur Beschreibung der Wirbelbewegung durch die Transportgleichungen für die Turbulenzenergie k und die Dissipation ϵ (dynamische Gleichungen), die eine Reihe auf die Raumluftströmung zugeschnittene empirische Konstanten enthalten. Damit stehen acht gekoppelte partielle Differentialgleichungen zur Berechnung von drei Geschwindigkeitskomponen-

ten, Druck, Temperatur, Konzentration, Turbulenzenergie und Dissipation zur Verfügung.

Die Lösung dieser Gleichungen ist für jeweils einen kompletten Satz von Anfangs- und Randbedingungen durchzuführen. Die Anfangsbedingungen betreffen Geschwindigkeit (drei Komponenten), Temperatur, Konzentration, Turbulenzenergie und Dissipation im gesamten Berechnungsgebiet zum Anfangszeitpunkt. Die Randbedingungen betreffen die gleichen Größen zu jedem betrachteten Zeitpunkt auf dem Rand des Berechnungsgebietes.

Für die Bestimmung der Wandtemperaturen bzw. Wärmeströme wird geeignete Software, z. B. zur Kühllastberechnung, angeboten. Die Massekonzentration bzw. die Massestromdichte am Rand des Berechnungsgebietes kann mit Hilfe von Kennzahlgleichungen berechnet werden.

Die Grundlagen der mathematisch-numerischen Lösung des Gleichungssystems mit ResCUE bestehen darin, daß das diskrete Modell über eine Druckgeschwindigkeits-Iteration und eine Finite-Volumen-Methode hergeleitet wird. Das Berechnungsgebiet ist mit Hilfe eines äquidistanten oder nicht-äquidistanten versetzten orthogonalen Gitters diskretisiert. Gegenüber der von *Harlow* und *Welch* verwendeten expliziten Lösungsstrategie kommt ein etwas modifizierter Algorithmus zum Einsatz. Zur Lösung des großen linearen Gleichungssystems zur Druck- oder Druckkorrekturberechnung wird eine Mehrgittertechnik eingesetzt. Die Untersuchungen von *Rösler* [8] bestätigen, daß die notwendige Schrittweite stark problemabhängig ist und erhebliche Auswirkungen auf das Ergebnis haben kann. Außerdem ergab sich, daß es bei der verwendeten expliziten Lösungsstrategie je nach Aufgabenstellung zu extrem kleinen Zeitschrittweiten und damit großen Rechenzeiten kommen kann.

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß die Berechnung beliebiger Raumluftströmungen fehlerbehaftet sein wird. Das liegt an den Unzulänglichkeiten der physikalischen und mathematischen Modelle, der Beschränkung auf relativ wenig Gitternetzpunkte und an den Schwierigkeiten bei der Formulierung der Anfangs- und Randbe-

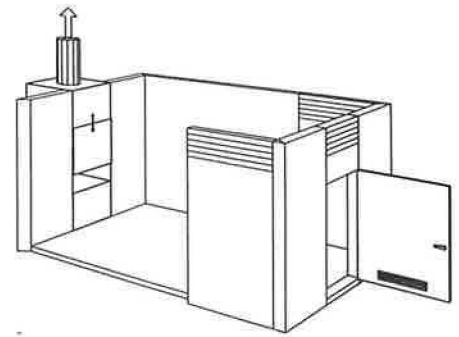


Bild 1 Modellraum mit Abzug

dingungen, auf die bei der Behandlung der Berechnungsbeispiele eingegangen wird.

Um den Stand und die Leistungsfähigkeit verschiedener Verfahren zur Berechnung von nichtisothermen Raumluftströmungen zu testen, wurden im Rahmen des Programms Annex 20 in verschiedenen Ländern spezielle Untersuchungen durchgeführt. Sie bestanden darin, daß an vereinbarten Testräumen Messungen und Rechnungen ausgeführt wurden. Der Vergleich der Ergebnisse (ohne Konzentrationsfelder) [9, 10] ergab zum Teil beträchtliche Unterschiede. Die mit ResCUE berechneten weichen von den mittleren berechneten und gemessenen Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen relativ wenig ab. Aus der Analogie des Wärme- und Stofftransportes für sehr kleine Stoffströme kann geschlossen werden, daß eine ebenfalls gute Genauigkeit für die Konzentrationsfelder erwartet werden darf.

Daraus folgt, daß ein Bearbeitungsstand erreicht ist, der es gestattet, instationäre nichtisotherme Raumluftströmungen einschließlich der Konzentrationsfelder in aus Quadern aufgebauten Berechnungsgebieten mit guter Genauigkeit zu berechnen.

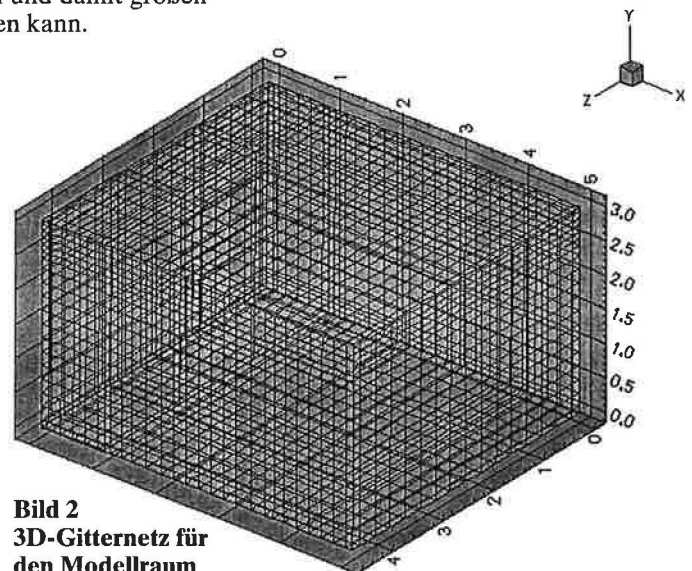


Bild 2 3D-Gitternetz für den Modellraum

Zur Raumluftströmungsberechnung werden im ILK Dresden zur Zeit PC mit Pentium 166, 64 MB RAM und 1 GB-Festplatte eingesetzt. Diese lassen bei zweidimensionalen Aufgaben 15 000 Gitterpunkte (90 000 Unbekannte) und bei dreidimensionalen 100 000 Gitterpunkte (800 000 Unbekannte) zu. Je nach Problemstellung können bis zum Erreichen des stationären Endzustandes mehrere hunderttausend Zeitschritte nötig sein, was aber vorher schwer abzuschätzen ist.

2. Berechnungsbeispiele

Der Modellraum hat Quaderform und keine Fenster (siehe Bild 1). Der Tischabzug ist normgerecht ausgeführt und aus dem Labor hinausgesetzt. Versperungen durch Möblierung und Personen werden nicht berücksichtigt, da hierdurch die Gefahr des Ausströmens von Schadstoffen aus dem Abzug meist noch vergrößert wird. Die Anfangs- und die Zulufttemperatur des Raumes sind 20 °C, ein Wärmetransport über die Rauminnenflächen wird der Einfachheit halber nicht angenommen. Untersucht werden verschiedene Fälle mit im Vergleich zur Zuluft um 8 K größerer (Abzug geheizt) und 8 K kleinerer (Abzug gekühlt) Temperatur im Abzug und unterschiedlich zugeführter Zuluft. Die Luft im Abzug enthält anfangs gleichmäßig verteilt Ammoniak in einer Massekonzentration von 5 mg/m³. Es wird davon ausgegangen, daß die kritischen Zustände bei einem plötzlichen vollständigen Öffnen des anfangs vollständig geschlossenen Frontschiebers und bei plötzlichem Erreichen der Zuluftgeschwindigkeit auftreten. Dabei stellen sich in dem aus Modellraum und Abzug bestehenden Berechnungsgebiet Strömungszustände und Konzentrationsverteilungen ein, die im folgenden diskutiert werden.

Abzug gekühlt, Zuluft oben aus den Seitenwänden

Zunächst wird ein für die Kältetechnik relevanter Fall mit niedriger Temperatur im Abzug untersucht. Die Zuluft tritt von der Tür aus gesehen oben aus der rechten und linken Seitenwand mit einer Geschwindigkeit von $v_m = 0,2$ m/s aus. Die Zuluftöffnungen über und in der Tür sind geschlossen. Das Gitternetz (Bild 2, 3) ist der relativ einfachen Geometrie entsprechend nicht besonders fein. Bild 3 zeigt in zwei Schnittebenen die ausgebildete Geschwindigkeits- und Konzentrationsverteilung. Man erkennt die eintretenden Strahlen, zwei ausgebildete Raumluftwirbel und vergleichsweise große Geschwindigkeiten im obern

Eintrittsbereich des Abzuges. Die auftretenden Maximalgeschwindigkeiten verändern sich besonders in den ersten Sekunden nach Öffnen des Frontschiebers. So ergeben sich z. B. Geschwindigkeiten von 0,37 m/s nach 24 s und von 0,31 m/s im ausgebildeten Zustand.

Die zeitliche Entwicklung der Strömungsstruktur und der Konzentrationsverteilung in der Mittelebene (Bild 4) wird durch die Ausbildung und Bewegung großräumiger Wirbel gekennzeichnet. Nach Öffnen des Frontschiebers fällt die kalte, mit Schadstoff beladene Luft in den Modellraum und induziert einen linksdrehenden Wirbel, während gleichzeitig die Raumluft in den Abzug einströmt. Das Ausströmen aus dem Abzug wird durch die Raumströmung wenig behindert, weil deren entgegengesetzter Impuls klein ist. Der Wirbel bewegt sich in den Raum hinein in Richtung Tür und wird dabei abgeschwächt, bis nur ein kleiner Wirbel unter der Abzugsöffnung verbleibt. Auch in den Konzentrationsverteilungen ist die mit den Wirbeln verbundene Schadstoffbewegung ersichtlich. Nach 60 s ist im Mittelschnitt die Ammoniakkonzentration verschwindend klein. Allerdings zeigt die Verteilung in einer dazu normalen Ebene (Bild 3) viel größere Konzentrationen und damit Verweilzeiten.

Abzug gekühlt, Zuluft oben über der Tür

Um dem Austreten der kalten Luft aus dem Abzug einen größeren Widerstand (Impuls) entgegenzusetzen, wird eine zweidimensionale Variante mit einer Zuströmung zum Modellraum über der Tür und einer Eintrittsgeschwindigkeit von $v_m = 0,4$ m/s untersucht. Während zu Beginn der gesamte Raum gleichmäßig durchströmt wird, bildet sich, wie auch aus Bild 5 ersichtlich, mit der Zeit von der dem Abzug gegenüberliegenden Wand ein „Anfahrwirbel“ aus, der letztlich einen großen Teil des Modellraumes umfaßt. Bei den vorliegenden Verhältnissen gelingt es jedoch nicht, den gesamten Schadstoffstrom in den Abzug zurückzuführen, sondern ein Teil wird vom sich ausbildenden Raumluftwirbel erfaßt und eingemischt. Man erkennt daraus, daß die Dynamik der Ausbildung der Raumluftströmung einen entscheidenden Einfluß auf die Schadstoffverteilung im Raum hat.

Vergleicht man die Konzentrationsverteilung 6,5 Minuten nach Öffnen des Frontschiebers bei verschiedenen Luft-eintrittsgeschwindigkeiten, so zeigen sich stark und nicht monoton verändernde Maximalkonzentrationen im Feld:

Eintrittsgeschwindigkeit in m/s	Konzentration in mg/m ³
0,1	0,835
0,2	0,990
0,4	0,021

Daraus folgt, daß es nötig ist, ausreichend große Volumenströme durch den Abzug zu fördern und diese Volumenströme möglichst schnell nach Öffnen des Schiebers zu erreichen. Durch die Regelung der Abzüge wird diesen Anforderungen entsprochen.

Abzug geheizt, Zuluft oben über der Tür bzw. unten in der Tür

Zur Beantwortung der Frage nach einer vorteilhaften Anordnung der Zuluftöffnungen wurden zweidimensionale Rechnungen für den geheizten Abzug und eine Zuluftgeschwindigkeit von $v_m = 0,2$ m/s durchgeführt. Die zeitliche Entwicklung der Strömungsstruktur und der Konzentrationsverteilung (Bild 5 und 6) zeigt wieder die Ausbildung großer Raumluftwirbel, die an der dem Abzug gegenüberliegenden Wand entstehen. Des weiteren tritt schadstoffbeladene warme Luft oben aus dem Abzug aus und wird von den sich bildenden Wirbeln erfaßt und in diese eingemischt. Bezüglich der Konzentration ist für den Heizfall ein gravierender Vorteil der Luftzuführung oben zu erkennen.

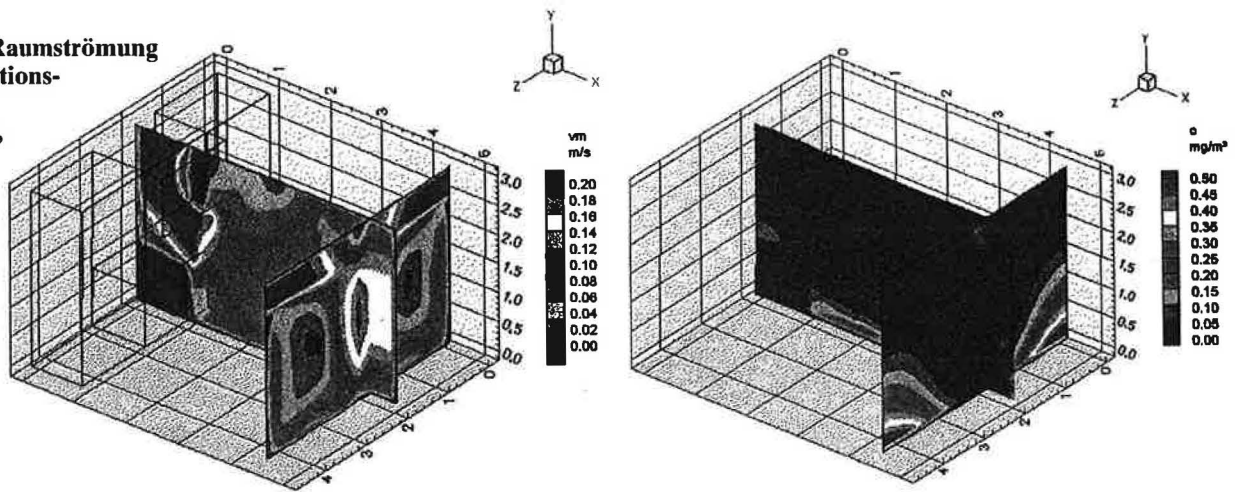
Die Hoffnung, bei geheiztem Abzug durch ein deckennahes Ausblasen im Türbereich die Schadstoffwolke nach ihrem Austreten wieder in den Abzug zurückzudrängen, erfüllt sich nur, wenn, wie weitere nicht näher dargestellte Rechnungen gezeigt haben, die Austrittsgeschwindigkeit gleichzeitig deutlich vergrößert wird. Im voraus ist schwer vorherzusagen, ob es gelingt, den Schadstoffaustritt gleich nach dem Öffnen des Frontschiebers zu unterbinden. Noch unübersichtlicher sind die Verhältnisse bei beliebiger Luftzuführung und merklichen thermischen Einflüssen.

Die Konzentrationsfeldberechnung bietet weiterhin die Möglichkeit, den zeitlichen Verlauf der maximalen Konzentration im Raum zu verfolgen (Bild 7). Für verschiedene Raumpunkte unterscheiden sich die Konzentrationsverläufe erheblich. Für die Tracergas-Messungen folgt daraus, daß die Gaszugabe und -entnahme entsprechend zur Aufgabenstellung gezielt erfolgen muß.

3. Zusammenfassung

An ausgewählten Beispielen wird demonstriert, daß außer den bekannten Maßnahmen, wie z. B. die schnelle Einstellung eines stark vergrößerten Abluftvolumenstromes durch den Abzug nach

Bild 3
Ausgebildete Raumströmung
und Konzentrations-
verteilung;
Abzug gekühlt,
Zuluft
oben in den
Seitenwänden,
 $v_m = 0,2 \text{ m/s}$



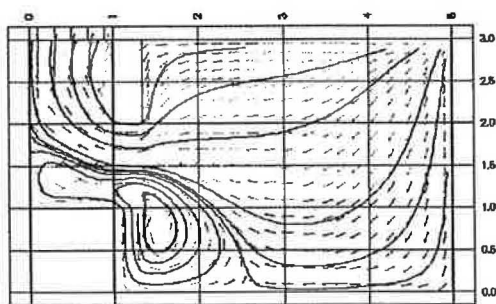
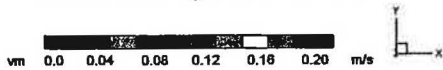
dem Öffnen des Frontschiebers, weitere wichtige Einflüsse zu berücksichtigen sind. Das betrifft die Austrittsgeschwindigkeit und die Anordnung der Zu-

luftöffnungen, die im Zusammenwirken mit dem Anfahrwirbel den Austritt von Schadstoffen in den Laborraum bestimmen. Dabei sind für Über- und Unter-

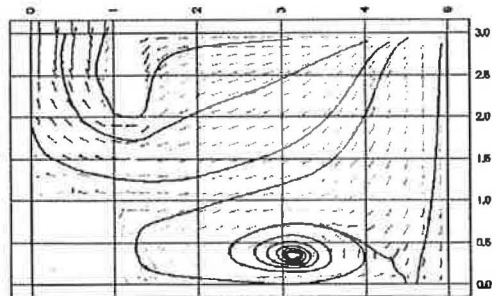
temperatur im Abzug unterschiedliche Lösungen vorteilhaft.

Damit kann bei der Untersuchung der Wechselwirkung von Abzugs- und

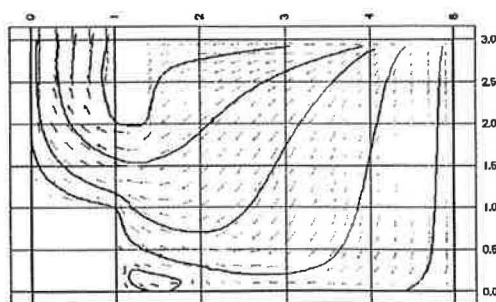
Geschwindigkeitsvektoren



nach 12s



nach 24s



nach 60s

Konzentration

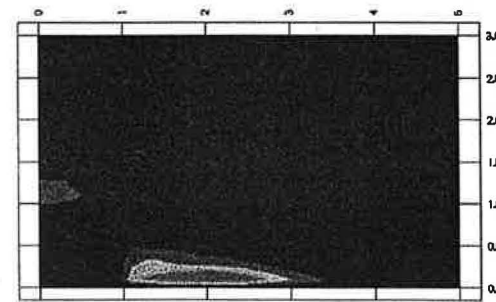
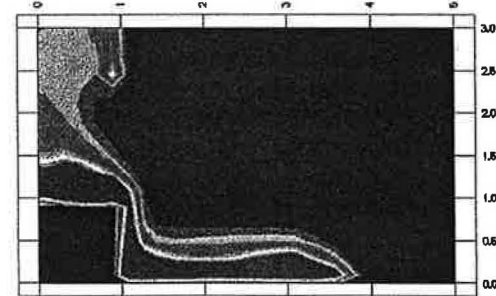
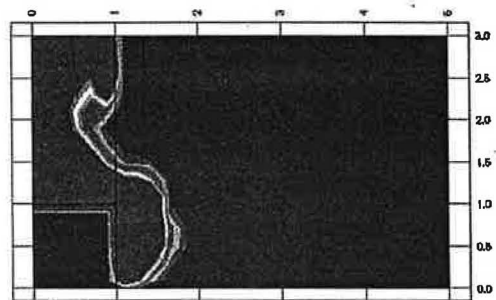


Bild 4 Zeitliche Entwicklung der Strömungsstruktur und der Konzentrationsverteilung; Abzug gekühlt, Zuluft oben in den Seitenwänden, $v_m = 0,2 \text{ m/s}$

Raumluftrömung für die vielfältigen in der Praxis auftretenden Randbedingungen die numerische Berechnung der Raumluftrömung unter Einschluß der

Konzentrationsfelder vorteilhaft eingesetzt werden. Das gilt z. B. auch dann, wenn Labors zusätzlich zu den Abzügen mit Abluftsystemen ausgestattet sind.

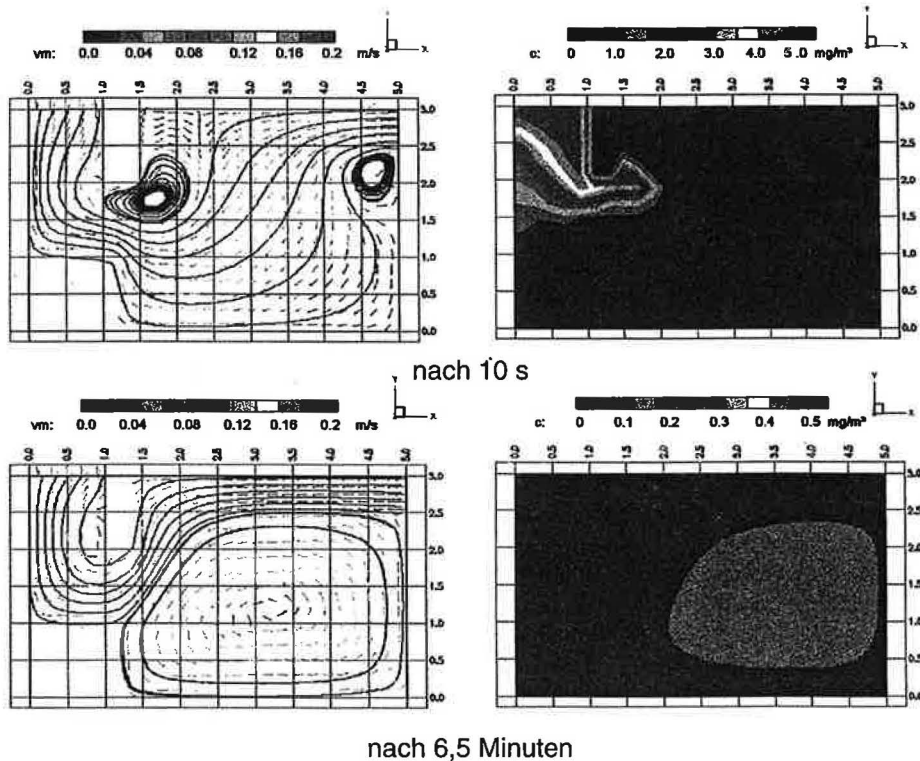


Bild 5 Zeitliche Entwicklung der Strömungsstruktur und der Konzentrationsverteilung; Abzug geheizt, Zuluft oben in der Tür, $v_m = 0,2 \text{ m/s}$

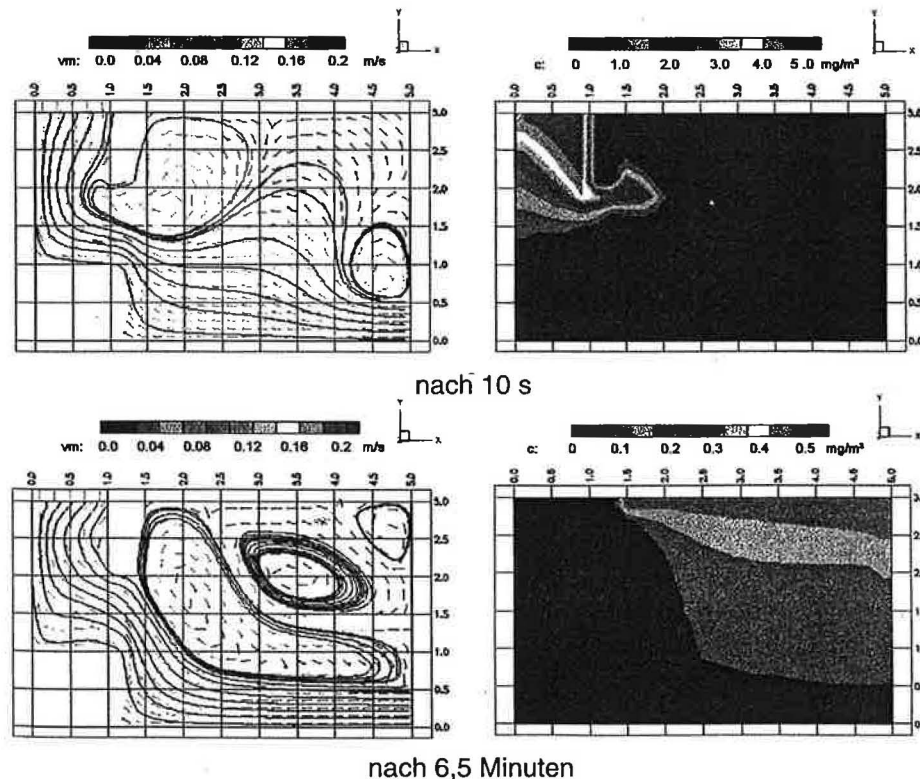


Bild 6 Zeitliche Entwicklung der Strömungsstruktur und der Konzentration; Abzug geheizt, Zuluft unten in der Tür, $v_m = 0,2 \text{ m/s}$

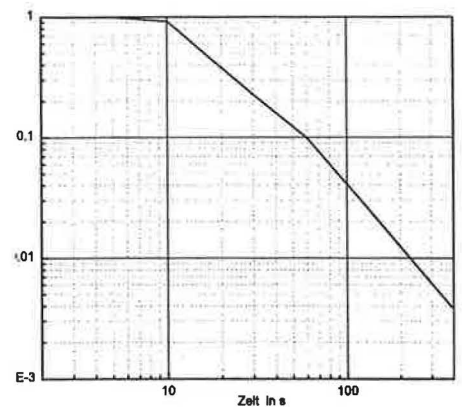


Bild 7 Abbau der maximalen Schadstoffkonzentration im Modellraum; Abzug gekühlt, Zuluft oben über der Tür, $v_m = 0,4 \text{ m/s}$

Literatur

- [1] Döge, K., Ehle, A.: Numerische Berechnung der Raumluftrömung zur Unterstützung des Fachplaners. *Ki Luft- und Kältetechnik* 31 (1995) 6, S. 262-65
- [2] Döge, K., Ehle, A.: Die Kühlluftströmung in Hochregallagern. *Ki Luft- und Kältetechnik* 32 (1996) 4, S. 160-64
- [3] DIN 1946-7: Raumluftechnik. Raumluftechnische Anlagen in Laboratorien. Beuth Verlag, Berlin (1991)
- [4] DIN 12924-1: Abzüge. Abzüge für allgemeinen Gebrauch. Beuth Verlag, Berlin (1991)
- [5] DIN 12924-2: Abzüge. Abzüge für offene Anschlüsse bei hohen Temperaturen. Beuth Verlag, Berlin (1994)
- [6] Raatschen, W.: Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. *gi Gesundheits-Ingenieur*, 116 (1995), H. 2 und 3
- [7] Scholz, R.; Hanel, B.: Computergestützte Berechnung der Raumluftrömung. Verlag Technik, Berlin (1988)
- [8] Hanel, B.: Raumluftrömung. C. F. Müller Verlag, Heidelberg (1994)
- [9] Rösler, M.: Mathematisch-numerische Untersuchungen zur Berechnung von dreidimensionalen inkompressiblen Kanal- und Raumluftrömungen. Diss. TU Dresden (1992)
- [10] Whittle, G. E., Clancy, E. M.: Annex 20. Air flow pattern within buildings, Presentation of results from measurements and simulations of test cases b, d and e. Interim report. London (1991)
- [11] Whittle, G. E.: Evaluation of Measured and Computed Test Case Results from Annex 20, Subtask 1. Proceedings of the 12 th AIVC Conference Air Movement and Ventilation Control Within Buildings 24.-27 Sept. 1991 in Ottawa

Schlüsselwörter:

Nichtisotherme Raumluftrömung
Konzentrationsfelder
Abzüge
Simulation
Computerprogramm ResCUE