

DYNAMISCH THERMISCHES CFD VERFAHREN

Tobias Zitzmann¹, Peter Pfrommer¹, Malcolm Cook²

¹Fachhochschule Coburg, Bauingenieurwesen, Germany

¹Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, England
 zitzmann@fh-coburg.de

KURZFASSUNG

Zur Reduktion des Zeitaufwands von dynamisch thermischen Langzeitsimulationen mit CFD Programmen wurde in kürzlich veröffentlichten Studien eine neuartige Freeze-Flow Methode vorgestellt. Diese basiert auf der periodischen Umschaltung zwischen der volldynamischen Lösung aller Gleichungen und der ausschließlichen Lösung der Enthalpie-Gleichungen (eingefrorene Luftströmung).

Dieser Artikel beschreibt eine neue automatisierte Regelung für diese Umschaltung, wodurch eine zusätzliche Reduzierung der Simulationszeit erzielt wird. In Tests an Modellen für die mechanische und freie Lüftung sowie der freien Konvektion im geschlossenen Raum für feste und zeitveränderliche thermische Randbedingungen wurde im Vergleich zur ununterbrochenen volldynamischen Simulation eine Simulationszeiteinsparung von bis zu 93 % erreicht.

ABSTRACT

Previously published studies have presented a novel freeze-flow method for reducing CPU requirements of long-term dynamic thermal simulations using CFD programs. This works by intermittently switching between solution of the full dynamic equations and solution of the enthalpy equation only (frozen flow).

This paper describes a new automated control method for this switching strategy and shows an additional decrease in simulation time. In tests with models for mechanical and natural ventilation and for free convection in a sealed room with constant and time varying thermal boundary conditions, a simulation time reduction of up to 93 % was achieved when compared to a continuous fully dynamic simulation.

EINLEITUNG

Zur dynamischen Gebäudesimulation wurden in der Vergangenheit hauptsächlich zonale Computermodelle wie TRNSYS eingesetzt, die jedoch den Wärmetransport durch die Bauteilmasse nur eindimensional annähern und die - vor allem -

keine Raumlufströmungen einbeziehen. Dies kann in bestimmten Fällen zu erheblichen Rechenungenauigkeiten führen. Aufgrund der Zunahme an Rechnerleistung und einer neu eingeführten zeitreduzierenden Freeze-Flow Technik lassen sich inzwischen auch CFD Programme mit ihrer viel höheren Detailgenauigkeit für dynamische Langzeitsimulationen einsetzen. Bei dieser Methode wird das Strömungsfeld zeitweise für feste Zeitspannen eingefroren, wodurch sich der Rechenaufwand nur auf die Lösung der Enthalpie-Gleichungen reduzieren lässt. Außerdem sind größere Zeitschritte möglich, da in dieser Zeit Strömungsturbulenzen nicht berechnet werden müssen. Das Strömungsfeld wird zwischenzeitlich in bestimmten Abständen „aufgetaut“ und den neuen Bedingungen angepasst.

Somarathne et al. (2005) ermittelten mit dieser Methode für die freie Konvektion in einem einfachen geschlossenen Raum Zeiteinsparungen von bis zu 90%, für die mechanische Lüftung in einem komplexeren Testraum mit wechselnden Wärmequellen immerhin eine Reduzierung um 20 %. Hierbei musste die Simulation für einen Wechsel zwischen uneingefrorener und eingefrorener Periode noch per Hand gestoppt und wieder neu gestartet werden.

In Untersuchungen von Zitzmann et al. (2006) konnte mit einer entsprechenden (jedoch automatisierten) Technik unter Verwendung der kommerziellen CFD Plattform CFX für ein ähnliches Raummodell vergleichbare Leistungen erzielt werden. CFX wurde im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeit bereits zuvor für die Simulation der freien Konvektion im Raum validiert (Zitzmann et al., 2005).

In der von Somarathne beschriebenen Freeze-Flow Technik wird der Wechsel zwischen eingefrorenem und uneingefrorenem Strömungszustand zeitlich starr vorgegeben. Dadurch ist die Regelung nicht in der Lage auf unvorhersehbare dynamische Änderungen der temporären und lokalen thermischen Bedingungen im Raum differenziert einzugehen, was größere Rechenfehler zur Folge haben kann. Daher wurde in weiterführenden Untersuchungen eine neue Regelung entwickelt, die auf diese thermischen

Bedingungen effizient und automatisch reagieren kann. Hierbei soll die Simulationsdauer uneingefrorener Luftströmung verkürzt und die Dauer eingefrorener Strömung möglichst verlängert werden.

REGELUNG

Wechsel von uneingefrorenem zu eingefrorenem Strömungszustand

Die Anzahl der notwendigen Iterationen innerhalb eines Zeitschritts zur Erreichung einer vorgegebenen Konvergenz reduziert sich während einer uneingefrorenen Strömungsperiode von einem großen Wert am Anfang (starke Strömungsänderung aufgrund der neuen Randbedingungen) allmählich auf eine niedrige konstante Zahl (geringe Strömungsänderung). Erst nach Erreichen dieses Zustandes ist es sinnvoll, in den eingefrorenen Strömungszustand zu wechseln. Als Hauptkriterium für das Umschalten zum eingefrorenen Zustand dient daher das Erreichen einer definierten maximalen Iterationsanzahl MAXLOOPS. Aufgrund der thermischen Trägheit der Luft sind die thermischen Fehler im Raum, die während der eingefrorenen Periode unterlaufen sind, trotz Erreichen der vorgegebenen Iterationszahl häufig noch nicht vollständig kompensiert. Daher ist in der Regel eine zusätzliche Verlängerung EXTENSION der uneingefrorenen Zeitspanne notwendig.

Wechsel von eingefrorenem zu uneingefrorenem Strömungszustand

Während der Periode eingefrorener hydrodynamischer Gleichungen ändern sich nur die Entalpie-Gleichungen. In diesem Fall lässt sich das Simulationsproblem auf die lokalen Temperaturwerte reduzieren. Da das eingefrorene Strömungsfeld eine vorgegebene thermische Situation repräsentiert, führt während einer eingefrorenen Periode jede Änderung des Temperaturfeldes in der Strömung bzw. an den Raumboflächen zu einem Berechnungsfehler. Um diesen Fehler zu minimieren, dürfen die Änderungen der Temperaturen nicht zu groß ausfallen. Als Kriterium zum Umschalten in den uneingefrorenen Zustand dient daher ein vordefiniertes Maximum MAXTEMP der lokalen Temperaturdifferenzen im Raum (d.h. in jedem finiten Volumenelement) zwischen Beginn und aktuellem Zeitpunkt während des eingefrorenen Zustandes.

Im untersuchten Fall der freien Konvektion liefern beispielsweise Werte von 3, 180 s und 0.5 K für die Parameter MAXLOOPS, EXTENSION bzw. MAXTEMP hinsichtlich Genauigkeit und Simulationszeit optimale Ergebnisse.

Zusätzlich erkennt die Regelung durch vorzeitiges Einlesen der vorgegebenen Randbedingungen aus Datensätzen oder Zeitfunktionen im Voraus, ob in

nächster Zeit eine größere Änderung an den Randbedingungen stattfindet und unterbindet oder forciert, falls notwendig, einen Wechsel zwischen den Strömungszuständen.

SIMULATIONSMODELL

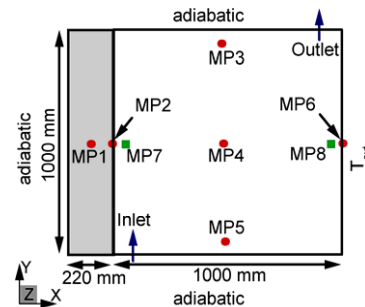


Abbildung 1: Skizze des Simulationsmodells

Die Effizienz der neuen Regelung wurde anhand eines einfachen Modells (Abbildung 1) für die typischen Strömungsfälle der mechanischen, der freien Lüftung sowie für die reine freie Konvektion im geschlossenen Raum überprüft. Als Testmodell diente ein 1 m^2 quasi zwei-dimensionaler Raum (Tiefe = max. Kantenlänge der finiten Volumenelemente), mit einer angrenzenden massiven Mauerziegelwand der Dicke 220mm. Die markierten, durchnummerierten (roten) Kreise und (grünen) Quadrate geben die Positionen der bei der Analyse verwendeten Monitorpunkte für die Temperaturen bzw. Geschwindigkeiten an.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Konstante Randbedingungen

Aus Platzgründen wird hier nur der Fall für die freie Konvektion nach einem Temperatursprung dargestellt. In diesem Fall wurden alle Lüftungsöffnungen geschlossen und das gesamte Raummodell mit $27,5^\circ\text{C}$ (Mauerwerk) bzw. $23,75^\circ\text{C}$ (Raumluft) initialisiert. Zu Beginn der Simulation wurde die Außentemperatur an T_{ext} sprunghaft auf 20°C reduziert, was einen Abkühlvorgang des Raumes bzw. des Mauerwerks bewirkt.

Abbildungen 2a und 2b zeigen eine hohe Übereinstimmung (Unterschiede kleiner 0.1 K bzw. 0.006 m/s) der Temperaturwerte und Geschwindigkeiten an den untersuchten Monitorpunkten für die neue Freeze-Flow Methode mit dem Basisfall (klassische Simulation ohne Strömungseinfrierung). In diesem Fall wurde gegenüber dem Basisfall eine Reduktion der CPU Zeit von 93 % und der Datenmenge von 78 % ermittelt.

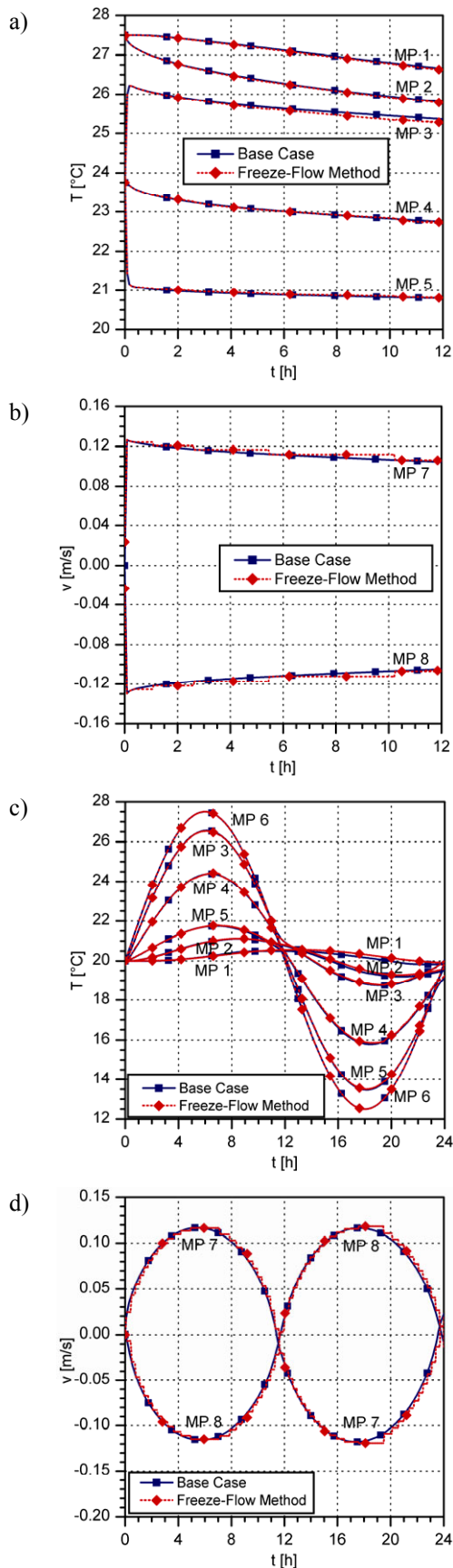


Abbildung 2: (a) Temperatur- und (b) Geschwindigkeitsverläufe für konst. Randbed.; (c) Temperatur- und (d) Geschwindigkeitsverläufe für zeitvar. Randbed. an verschiedenen Monitorpunkten

Sinusförmige Randbedingungen

Um die Regelmethode bei wechselnden Randbedingungen zu testen, wird dem Modell von Abbildung 1 ein sinusförmiges Temperaturprofil T_{ext} an der Außenwand aufgebracht:

$$T_{ext} = 7,5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / 86400) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Aus Abbildungen 2c und 2d ist zu erkennen, dass auch in diesem Fall die Werte für die neu entwickelte Regelung mit dem Basisfall ähnlich gut übereinstimmen. Hierbei wurde eine CPU Zeiteinsparung von 74 % und eine Reduktion der Datenmenge von 78 % erzielt.

Vergleich zur Regelung mit festen Zeitperioden

Die neue angepasste und die bisherige starre Regelung der ein- bzw. uneingefrorenen Zeitperioden führten für alle untersuchten Fälle zu vergleichbaren Ergebnissen, die mit dem Basisfall weitgehend übereinstimmen. Die neue Regelung erwies sich jedoch insbesondere in Zeiten mit schnell wechselnden Umgebungsbedingungen als genauer. Außerdem konnte mit dieser Regelung die Effizienz der Freeze-Flow-Methode bei fast allen Tests nochmals gesteigert werden. Im Beispiel der freien Konvektion im geschlossenen Raum und konstanter Randbedingungen wurde mit der starren Regelung eine Reduktion der Simulationszeit und Datenmenge von 78 % bzw. 68 % erreicht. Die neue Regelung verbesserte die Werte auf 93% bzw. 78%. Für den Fall mit zeitveränderlichen Randbedingungen ergab sich für beide Regelungen eine nahezu identische Effizienz.

DANKSAGUNG

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 1749B04 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

LITERATUR

- Somarathne S, Seymour M., Kolokotroni M., 2005: Dynamic thermal CFD simulation of a typical office by efficient transient solution methods, Building and Environment 40, S. 887-896.
- Zitzmann T., Cook M., Pfrommer P., Rees S., Marjanovic L., 2005: Simulation of steady-state natural convection by using CFD, Proc. of the 9th Int. Building Simulation Conf., Montreal, Kanada, S. 1448-1456.
- Zitzmann T., Pfrommer P., Cook. M., 2006: Simulation dynamisch thermischen Langzeitverhaltens in Gebäuden mittels CFD, BAUPHYSIK 28, S. 96-102.