

Numerische Simulation von Gebäudebelüftung mit einem Lattice Boltzmann-LES-Modell

In diesem Beitrag werden Belüftungseffekte am Beispiel des EnergieForums Berlin untersucht. Um Erkenntnisse über den Einfluss fluktuierender Windfelder auf die Belüftung zu erzielen, wird die Windumströmung und Temperatur im und um das Atriumgebäude mit einer Large Eddy Simulation (LES)-Modell zeitaufgelöst und räumlich untersucht. Dazu wird das Lattice Boltzmann-Verfahren mit dem Multi Relaxation Time (MRT)-Modell auf einem D3Q19-Gitter verwendet. Das kürzlich entwickelte Eso-Twist-Verfahren, das nur einen einzigen Lattice Boltzmann-Verteilungssatz benötigt, kommt zum Einsatz. Als LES-Modell wird das Smagorinsky-Modell verwendet. Zur Temperaturmodellierung dient das HTLB-Verfahren. Die Simulationen werden CUDA-basiert auf einer GeForce GTX 580 GPGPU durchgeführt. Anhand der Simulationen wird der Abfall der Tracergaskonzentration über der Zeit sowie der mittlere, durch Temperaturunterschiede und äußeren Wind induzierte Fluss bestimmt.

Numerical simulation of building ventilation with a Lattice Boltzmann LES model. *In this contribution ventilation effects are studied for the EnergieForum Berlin. To estimate the influence of external wind fields on the ventilation process, wind and temperature fields are simulated with a large eddy simulation (LES) model. With this approach spatially-and time-resolved output is generated. The Lattice Boltzmann method is being used on a D3Q19 grid with a multiple relaxation time (MRT) model. The recently developed EsoTwist scheme, which uses only a single set of LB distributions, is employed. The Smagorinsky model serves as the LES model. To model the temperature dynamics, the HTLB method is used. The simulations are CUDA-based and carried out on a GeForce GTX580 GPGPU. The decay of the tracer-gas concentration over time and the mean flow through the building generated by temperature gradients and external wind is determined.*

1 Einleitung

Das EnergieForum Berlin wurde 2002 als Atriumgebäude errichtet. Es ist darauf ausgelegt, den Energieverbrauch durch spezielle Speicher- und Lüftungstechniken minimal zu halten. Die innovativen Gebäudekonzepte wurden wissenschaftlich begleitet, so dass experimentelle Messungen im Windkanal und CFD-Rechnungen vorliegen [1]. Für die CFD-Rechnungen wurde bisher der Code Fluent mit dem k-ε-RANS-Modell verwendet. Als Ensemble-gemittelt Modell gibt es allerdings keine Informationen über den Einfluss von Windfluktuationen an den Gebäudeöffnungen. Andererseits wird vermutet, dass diese Fluktuationen

einen signifikanten Effekt auf die Belüftungseffektivität haben könnten, wenn beispielsweise verbrauchte Luft zurück ins Gebäude gelangt. Deswegen soll eine von Temperaturströmen getriebene Luftströmung im Atrium hier mit einem LES-Modell untersucht werden. Aufgrund des hohen Rechenaufwands existieren in der Literatur bisher nur wenige CFD-Studien mit LES zur zeitabhängigen Gebäudebelüftung. Eine Ausnahme sind *Jiang* und *Chen* [2], die RANS- und LES-Modelle mit Experimenten an Räumen in Originalgröße vergleichen. Sie stellen fest, dass die LES-Rechnungen für Lufttemperatur und Belüftungseffizienz zu verlässlicheren Ergebnissen führen als die RANS-Rechnungen. In dem von ihnen untersuchten Fall wurde der Fluss von der mittleren Geschwindigkeit und weniger von der Temperatur bestimmt. Wie *Jiang* und *Chen* anmerken, kann LES gerade für sehr kleine äußere Geschwindigkeiten bei hohen Temperaturgradienten Vorteile gegenüber Windkanalversuchen haben. So ein Fall soll hier für das EnergieForum bei geringer Windstärke untersucht werden.

Das Lattice Boltzmann (LB)-Verfahren hat sich in den späten 80er Jahren aus den Zellulären Automaten als neuer Lösungsansatz in der Computational Fluid Mechanics entwickelt [3]. Anders als konventionelle Ansätze zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen, bauen LB-Verfahren auf einer Diskretisierung der Boltzmann-Gleichung zur zeitabhängigen Beschreibung der thermodynamischen Ensembles auf. In ihrer einfachsten Form wird eine Relaxation der Nichtgleichgewichtsanteile der LB-Verteilungen mit einem einzigen Relaxationsparameter, der Kollisionszeit, durchgeführt. Fortgeschrittene Verfahren verwenden mehr als einen Parameter und nennen sich deshalb Multiple Relaxation Times-Verfahren (MRT) [4]. Bei diesen Verfahren wird der Lattice Boltzmann-Kollisionsschritt durch folgende Gleichung beschrieben

$$f_i^*(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i, t + dt) = f_i(\mathbf{x}, t) + M^{-1} S M \left(f_i^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t) \right) \quad (1)$$

wobei S eine Diagonalmatrix ist, deren Einträge die Relaxationsfaktoren darstellen und f_i^{eq} die Gleichgewichtsverteilungsfunktion. Für den kontinuierlichen Fall entsprechen diese Gaußfunktionen. Die lineare Transformation M bildet die diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen f auf Momente ab. Einige der Relaxationsraten können frei gewählt werden, zum Beispiel um die Stabilität des Verfahrens zu verbessern. Diese sind hier zu eins gesetzt. Das bedeutet, dass die zugehörigen Momente in jedem Zeitschritt einfach

auf ihren Gleichgewichtswert gesetzt werden. Die verbleibende Relaxationsrate λ wird über den Zeitschritt Δt und die Viskosität ν zu $\nu = (2\lambda - 1)/6 \Delta x^2/\Delta t$ bestimmt. In unserem Fall werden für das LB-Verfahren 19 direkte Nachbarn verwendet, was 19 diskreten Geschwindigkeitsvektoren e_i entspricht. Diesem Nachbarschaftsschema liegt ein kartesisches Gitter zugrunde. In Allgemeinen können solche kartesischen Gitter auch nicht-uniform sein [5], [6]. Ein Vorteil des LB-Verfahrens gegenüber konventionellen Verfahren ist, dass das Verfahren sehr lokal ist und deswegen effizient parallelisiert werden kann. Damit eignet es sich auch besonders für Berechnungen auf Grafikkarten (GPGPUs). Dies ist für Anwendungen wie diese besonders wichtig, da Windströmungen in und um Gebäude großskalig und üblicherweise hochturbulent sind. Dadurch ist die numerische Simulation sehr aufwändig, besonders wenn keine einfachen Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)-Modelle verwendet werden sollen. Wie [7] gezeigt hat, können die etablierten Navier-Stokes-Turbulenzmodelle, die auf Eddy-Viskositätsansätzen beruhen, auch für Lattice Boltzmann-Ansätze verwendet werden. Die einfachste und am weitesten verbreitete Methode unter den Large Eddy-Modellen ist das Smagorinsky-Modell. In diesem Modell ist die turbulente Viskosität einfach proportional zur Dehnrate. Diese kann lokal berechnet werden, ohne dass Informationen von den benachbarten Knoten benötigt werden. Dadurch zeigt das Verfahren optimale Eigenschaften für die Parallelisierung. Die turbulente Viskosität berechnet sich über

$$\nu_t = \Delta x_s^2 \frac{3\lambda}{2} \sqrt{\sum_{\alpha, \beta} \left(\sum_i (f_i - f_i^{eq}) e_{i\alpha} e_{i\beta} \right)^2} \quad (2)$$

Für die Modellierung der Temperaturgleichung wurde das HTLB-Verfahren verwendet (*Lallemand and Luo, 2003*). In diesem Verfahren wird die Gleichung für die Temperaturdiffusion und -konvektion über eine separate Finite-Differenzen-Gleichung beschreiben. Der Boussinesq-Ansatz wird verwendet. Dabei wird angenommen, dass die Temperaturunterschiede ausreichend klein sind, um die Luftströmung nur durch einen Auftriebsterm zu beeinflussen. Die übrigen Einflüsse der temperaturbedingten Dichteänderungen werden vernachlässigt. Wenn turbulente Strömungen mit einem LES-Modell beschrieben werden, kann die turbulente Diffusion über eine konstante turbulente Prandtlzahl nach $Pr = \nu_t/\alpha_t$ ermittelt werden, wie von [8] beschrieben wird.

Die Simulationen wurden auf einer GTX580-GPGPU von der Firma NVIDIA durchgeführt. Sie ist die leistungsfähigste Single-GPGPU der Fermi-Architektur und verfügt über 3 GB Arbeitsspeicher, der mit mehr als 190 GB/s angebunden ist. Des Weiteren ist sie mit 512 Rechenkernen ausgestattet, die mit einer Taktrate von 1.544 MHz arbeiten. Daraus ergibt sich eine theoretische Floating-Point Performance von 1.581 GFLOPS. Wichtiger als die hohe Rechenleistung ist für unsere Applikation die erwähnte hohe Speicherbandbreite. Die hierfür notwendige Thread-parallele Multicore-Implementierung wurde unter Verwendung des CUDA-Frameworks realisiert.

Traditionell wurden für LBM-Implementierungen auf Grafikkarten 2 Sätze von Verteilungen verwendet. Grund

dafür ist die bereits erwähnte Thread-parallele Implementierung. Durch die beiden Datensätze konnte man sicherstellen, dass jeder Thread exklusiv auf seine Daten zugreift und diese einen konsistenten Wert haben. Der begrenzte Speicher auf der Grafikkarte führte zur Entwicklung einer Methode [9], die ebenfalls Thread-sicher ist und trotzdem nur halb so viel Speicher benötigt, ohne die Leistung negativ zu beeinflussen. Im Prinzip wird beim Datenzugriff teilweise lokal und teilweise bei den Nachbarknoten gelesen und geschrieben. Durch eine geschickte Wahl der Reihenfolge kann verhindert werden, dass sich mehrere Threads beim Datenzugriff behindern. Diese Methode hat den Namen Esoteric Twist (Eso-Twist).

2 Simulation

2.1 Aufbau

Es wird das oben beschriebene Smagorinsky LES-Modell mit dem D3Q19 MRT Lattice Boltzmann-Verfahren verwendet. Der Propagationsschritt erfolgt mit dem Eso-Twist-Schema. Für die Temperaturgleichung wird das HTLBE-Verfahren benutzt. Der Code ist in CUDA implementiert und wird auf der NVidia-Grafikkarte GeForce GTX580 ausgeführt. In dieser Arbeit werden keine Validierungsbeispiele gezeigt, weil Validierungen der einzelnen Programmkomponenten bereits in anderen Arbeiten durchgeführt wurden, wie zum Beispiel in [10] für das HTLBE-Modell und [11] für die Lattice Boltzmann-Kollision mit dem Smagorinsky Large Eddy-Modell. Ein Finite-Differenzen-Löser für die Gleichung für den Transport des Tracergases als passiver Skalar wurde implementiert, um die Belüftungseffizienz bestimmen zu können.

In Bild 1 ist das Studienobjekt EnergieForum Berlin in der Aufsicht gezeigt. Die für die Simulation relevanten Details sind eingezeichnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen und die jeweils gewählten Parameter. Es wurden zwei verschiedene Temperaturdifferenzen zwischen Gebäude und Umgebung betrachtet. Die Außengrenzen des Simulationsgebiets wurden als NoSlip-Ränder modelliert, so wie es auch in einem Windkanal der Fall wäre. Am Einfluss wurde eine konstante Geschwindigkeit parallel zur unteren Gebäudeöffnung vorgegeben. Dies soll dazu führen, dass die Außenströmung hauptsächlich

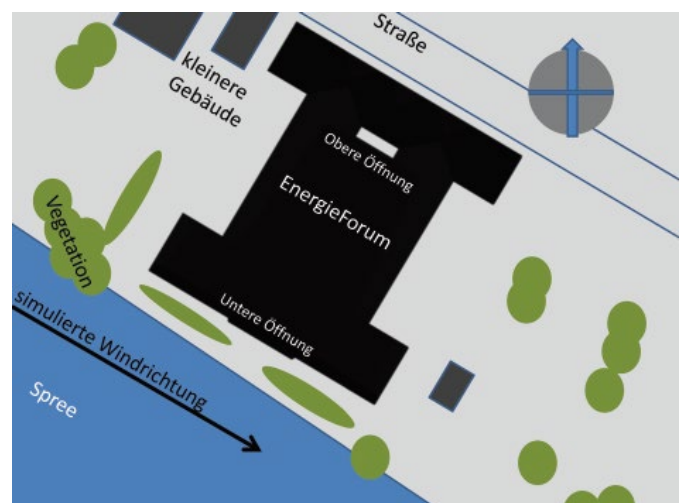


Bild 1. Luftbild des EnergieForums
Fig. 1. Aerial view of the EnergieForum

Tabelle 1. Für die Simulation gewählte Parameter
Table 1. List of the quantities used in the numerical setup

	Wert
Temperaturdifferenz	3 °C/30 °C
Temperatur Außenluft	20 °C
Reynoldszahl	15.000
Rayleighzahl	$1,7 \cdot 10^{10}/1,7 \cdot 10^{11}$
Prandtlzahl	0,75
Gebäudehöhe (Modell)	3 m
Gebietslänge/höhe/breite	10,2 m/4,8 m/9,6 m
Simulationszeit gesamt	36 s
Zeitschritte gesamt	300.000
Gitterauflösung	0,375 m

über Fluktuationen auf die Innenströmung wirkt und nur eine geringe mittlere Geschwindigkeit induziert. Es kann auch angenommen werden, dass es sich um eine häufig auftretende Windrichtung handelt, da dies einem Wind in nord-westlicher Richtung entlang der Spree entspricht. Der Ausflussrand wurde über einen konstanten Druck definiert. Für das Temperaturfeld und das Tracergas wurde angenommen, dass die Werte an allen Außengrenzen ihrem Fernfeldwert entsprechen. Zunächst wurde nur das Strömungsfeld und Temperaturfeld berechnet, um einen gültigen Anfangszustand zu erreichen. Nach 24 s simulierter Zeit wurde dann begonnen, die Verteilung des Tracergases über 12 s aufzuzeichnen. Es wurden fünf verschiedene Situationen untersucht, wobei Temperatur und Umgebungsgeschwindigkeit variiert wurden. Eine Auflistung der Parameter für diese fünf Fälle findet sich in Tabelle 2. Da LES-Simulationen immer nur eine von vielen möglichen Realisierungen der turbulenten Strömungen darstellen, wurden zu jedem Setup zwei verschiedene Rechnungen mit leicht variierten Anfangswerten durchgeführt.

In einem zweiten, vereinfachten Setup wurde nur noch das Innere des Atriums simuliert. An der oberen Öffnung wurde ein konstanter Druck angesetzt, an der unteren Öffnung wurde ein konstanter Fluss vorgeben. Es wurden die Flüsse $I_1 = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ und $I_2 = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ gewählt. Die Tracergaskonzentration und Temperatur werden an der Einflussoffnung auf den Fernfeldwert gesetzt und an der Ausflussoffnung extrapoliert. Die erste Simulation mit Fluss I_1 sollte in etwa den beiden Simulationen mit hohem Temperaturunterschied (C_1 und C_2) entsprechen, die zweite dem

Tabelle 2. Bezeichnung und Parameter der verschiedenen Simulationen
Table 2. Denotation and parameters of the different simulations

Bezeichnung	Geschwindigkeit [m/s]	Temperatur [°C]
C_1	6	30
C_2	0	30
C_3	6	3
C_4	0	3
C_5	6	0

Tabelle 3. Zeitgemittelte Flüsse durch das Atrium
Table 3. Time-averaged fluxes through the atrium for the five different cases studied

Bezeichnung	Fluss [m^3/s]
C_1	0,18
C_2	0,21
C_3	-0,01
C_4	0,04
C_5	-0,07

Fall C_4 (vgl. Tabelle 3). Anhand dieser Tests sollte untersucht werden, inwieweit ein solches vereinfachtes Modell den Verlauf der Tracergaskonzentration reproduzieren kann.

Als dritter Schritt wurde eine noch drastischere Vereinfachung durchgeführt: Es wurden die Abnahmen des Tracergases über die Zeit mit exponentiell abklingenden Funktionen verglichen. Es wurde untersucht, ob ein linearer Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit des Luftaustausches und dem mittleren Fluss durch das Gebäude angenommen werden kann. Als Referenz wird die Halbwertszeit von C_2 ermittelt. Die übrigen Halbwertszeiten werden dann über $\tau_i = \tau_2 I_i/2$ prognostiziert, wie dies aus dem Ansatz von [12] mit $V^{dk}/dt = I k$ folgt, wobei V das Volumen eines Raumes, k die Konzentration und I der Fluss ist. Verschiedene Räume sowie die Umgebung können über Flüsse gekoppelt werden. Solche zonenbasierten Ansätze sind in den Anwendungen sehr verbreitet, wie dies zum Beispiel in den ASHRAE-Normen [13] oder in [14] beschrieben ist.

2.2 Ergebnisse

Bild 2 zeigt den Abfall des Tracergases über die Zeit. Der schnellste Abfall ergibt sich für hohe Temperaturdifferenzen und verschwindenden äußeren Wind (Fall C_1). Am schlechtesten funktioniert der Luftaustausch für geringe Temperaturdifferenzen und bei geringem äußeren Wind (Fall C_3). Gleichzeitig wurden die mittleren Flüsse an der Eintrittsoffnung bestimmt. Tabelle 3 gibt die Flüsse an, die aus einer Mittelung zwischen den beiden Simulationen bestimmt wurden, wobei die Werte aus den beiden Simulationen um etwa $\pm 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ schwanken. Aus Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass die Flüsse, die durch Temperaturdifferenz und äußeren Wind generiert werden, einander entgegengesetzt sind. Im Fall C_3 liegt passend zum langsameren Abfall des Tracergases demnach auch ein geringerer mittlerer Fluss vor. Für den Fall C_1 scheint die Strömung durch den höheren Temperaturunterschied dominiert zu sein, so dass der relative Unterschied zu C_2 geringer ausfällt. Andererseits unterscheidet sich der Verlauf der Tracergaskonzentration zwischen C_1 und C_2 deutlich. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Flüsse sehr viel geringer sind, als dies bei einer laminaren, zeitlich konstanten Verdrängungsströmung aus den Tracergaskonzentrationen rückzuschließen wäre. Zeitabhängige turbulente Effekte scheinen eine wichtige Rolle zu spielen. Für die beiden Realisierungen mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen wird ein fast identischer Abfall der Tracergaskonzentration gemessen. Die mittleren Flüsse unterscheiden sich stark. Die instantanen Geschwin-

digkeiten weichen stark von den gemittelten ab. So liegt beispielsweise für den Fall C_3 die turbulente Intensität gemittelt über den Atriuminnenraum bei etwa 100 %. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die nur zweidimensional und zeitlich gemittelten Daten stärker fehlerbehaftet sind und dass ein sehr langes Mittelungsintervall notwendig wäre.

Mit den in den vorangegangenen Simulationen ermittelten und in Tabelle 3 dargestellten Parametern wurden zwei weitere Simulationen mit dem reduzierten Setup durchgeführt. Für den ausschließlich durch eine Temperaturdifferenz getriebenen Fall C_2 ist die Übereinstimmung recht gut, wie Bild 2 zu entnehmen ist. Für den zweiten untersuchten Fall sollte der Abfall etwas schneller als für C_4 erfolgen. Stattdessen findet der Abfall langsamer statt. Die Vermutung liegt nahe, dass die fehlenden turbulenten Fluktuationen zu diesem schwächeren Luftaustausch führen. Es wurde nun weiterhin untersucht, inwiefern ein exponentieller Abfall (wie im Abschn. Simulationsaufbau beschrieben) die Geschwindigkeit des Luftaustausches reproduzieren kann. Dies ist in Bild 3 dargestellt. In Anbetracht der erheblichen Messunsicherheiten für die Flüsse kann man von einer weitgehenden quantitativen Übereinstimmung sprechen. Eine Ausnahme bildet der Fall C_3 . Offensichtlich kann ein auf dem zeitgemittelten Fluss basierender Ansatz nicht zielführend sein, wenn dieser nahezu verschwindet.

Im Folgenden sollen nun noch einige qualitative Merkmale der unterschiedlichen Fälle herausgestellt werden. Alle Bilder wurden aus Daten 4,8 s nach Beginn der Tracergasberechnungen erstellt. Bild 4 gibt einen Eindruck von der instantanen Temperaturverteilung im Atrium. In Bild 5 sind die instantanen Geschwindigkeiten für die Gebäudeaufsicht auf der Höhe der unteren Gebäudeöffnung für die Fälle C_1 und C_2 dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit im Gebäude ist für beide Fälle vergleichbar, obwohl im oberen Fall keine Außenströmung vorhanden ist. Bild 6 zeigt die Tracergaskonzentration nach 4,8 s sowie die zeitgemittelten Stromlinien für die fünf untersuchten Fälle. Man sieht, dass für die Fälle C_1 und C_2 die Tracergaskonzentration niedriger ist.

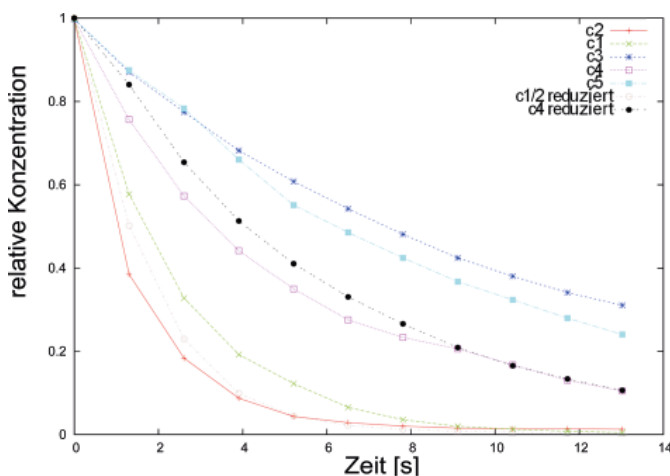


Bild 2. Tracergaskonzentration im Atrium über die Zeit für die fünf untersuchten Fälle und die zwei reduzierten Setups
Fig. 2. Decay of the concentration of the tracer gas inside the atrium over time for the five primary cases and the two reduced setups

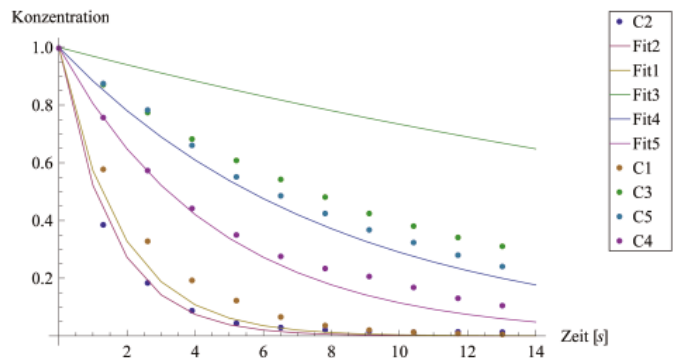


Bild 3. Vergleich zwischen Ergebnissen und exponentiellem Abfall in Abhängigkeit vom Luftfluss: C_1 beige, C_2 violett, C_3 lila, C_4 grün, C_5 türkis
Fig. 3. Comparison of the simulation results and an exponential decay fit function depending on the flux, C_1 beige, C_2 pink, C_3 violet, C_4 green, C_5 turquoise

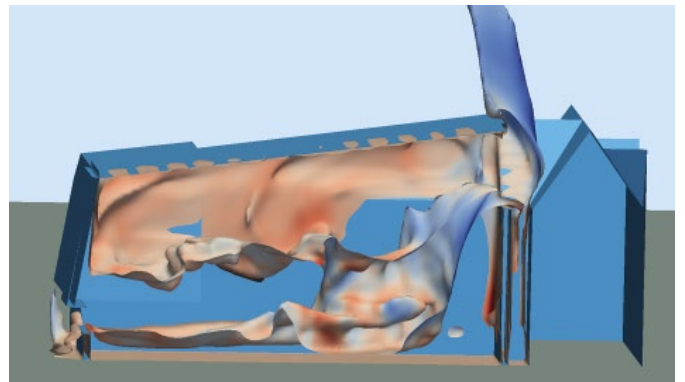


Bild 4. Isokontur auf die Temperatur 6,4 °C, eingefärbt nach der Tracergaskonzentration, für den Fall C_2
Fig. 4. Isocontour of the temperature at $\Delta T = 6.4$ °C for C_2 , colored by the tracer gas concentration

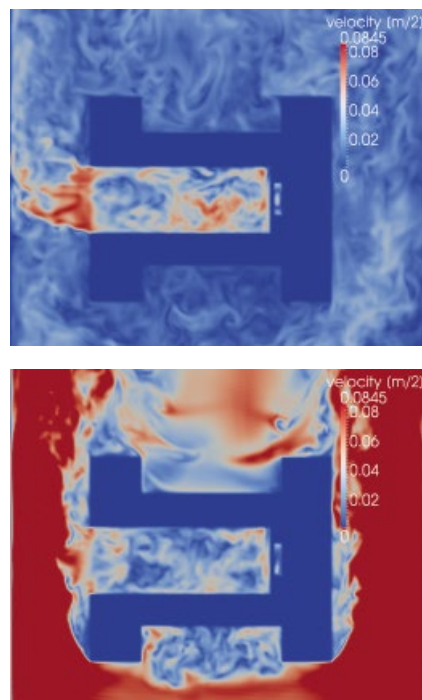


Bild 5. Instantane Geschwindigkeiten für die Fälle C_2 (oben) und C_1 (unten)
Fig. 5. Instantaneous velocities for cases C_1 (bottom) and C_2 (top)

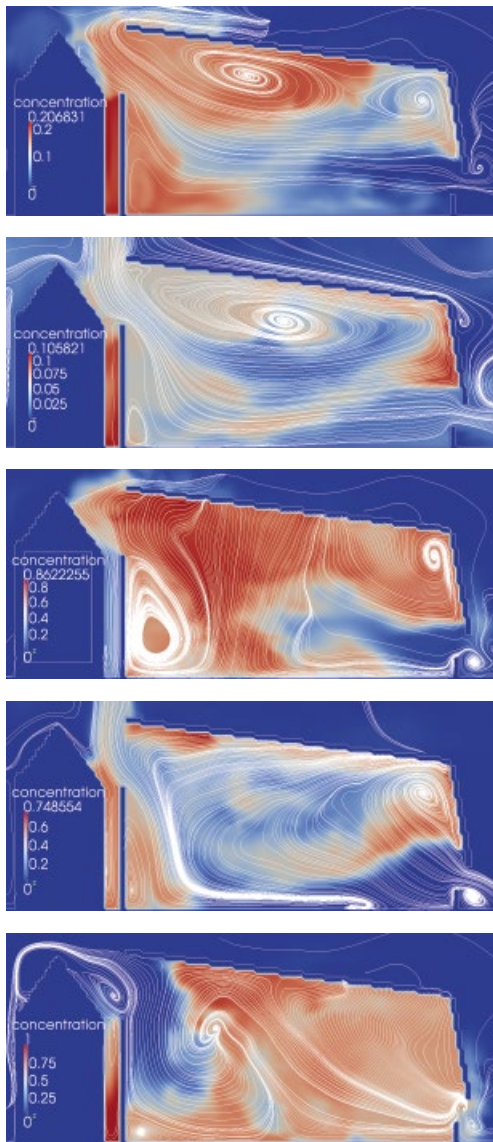


Bild 6. Zeitgemittelte Stromlinien und Tracergaskonzentrationen für die Fälle C_1 (oben) bis C_5 (unten)
 Fig. 6. Time-averaged streamlines and tracer-gas concentrations from top to bottom for cases C_1 to C_5

Für den Fall C_5 , bei dem keine Temperaturdifferenz vorgegeben ist, fließt die Strömung in umgekehrter Richtung. Die niedrigste Konzentration liegt an der oberen Öffnung vor. Dass dies für C_3 nicht der Fall ist, liegt daran, dass es sich um eine Momentaufnahme handelt und die Strömung stark fluktuiert.

Für die Simulation von 36 s Gebäudeumströmung wurden 4 h Rechenzeit benötigt. Bezogen auf die 8,1 Mio. Fluidknoten des Rechengbietes entspricht dies 170 Mio. Knotenupdates/s für die gekoppelte Strömungssimulation inklusive Temperaturlöser und Tracergas-Transport.

3 Fazit

Die temperaturgetriebene Luftströmung in einem Atrium mit schwachem äußerem Wind wurde simuliert. Die Umströmung des Atriengebäudes wurde dazu mitbetrachtet. Fünf verschiedene Fälle wurden betrachtet, um den Einfluss von Wind und Temperaturunterschied auf das Lüftungsverhalten abschätzen zu können. Dazu wurde der Abfall

eines Tracergases über die Zeit bestimmt. Da der durch den äußeren Wind induzierte mittlere Fluss dem durch Temperaturunterschiede verursachten Fluss entgegengesetzt war, stellte sich die effektivste Durchlüftung bei verschwindendem äußeren Wind und der höchsten Temperaturdifferenz ein. Dieser Fall konnte auch reproduziert werden, indem nur die Atrieninnenströmung mit dem vorher bestimmten Fluss simuliert wurde.

Insgesamt spielt aber die Durchmischung der Luft durch Turbulenz eine wichtige Rolle bei dem Belüftungsprozess. Bei der niedrigeren Temperaturdifferenz von 3 °C bricht der Fluss dramatisch ein. Das Tracergas fällt dabei ebenfalls am langsamsten von den untersuchten Fällen ab, jedoch nicht so langsam, wie dies ohne turbulente Durchmischung anhand der ermittelten Flüsse zu erwarten wäre. In diesem Fall können einfache Modelle, die nur entweder den äußeren Wind oder die Temperatur als dominanten Faktor in Betracht ziehen, keine verlässlichen Aussagen liefern. Es konnte gezeigt werden, dass GPGPU-basierte LES-Simulationen in akzeptabler Rechenzeit Trends zum Verhalten in diesen komplexen dreidimensionalen Situationen liefern können und damit existierende Modelle ergänzen. Für weitergehende Untersuchungen sollten Validierungsrechnungen zu den Windkanalversuchen durchgeführt sowie ein feineres Gitter an den Gebäudeoberflächen verwendet werden, wie dies etwa in den CPU-basierten LB-Simulationen von [15] der Fall ist. Für GPU-basierte Simulationen sind solche Ansätze noch in Arbeit.

Danksagung

Sonja Uphoff dankt dem SFB 880 für finanzielle Unterstützung. Ebenfalls für finanzielle Unterstützung dankt Maik Stiebler dem SFB/TR32.

Literatur

- [1] Gerder, F.: Bestimmung des durchschnittlichen, windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium am Beispiel des EnergieForums Berlin. PhD thesis, TU Braunschweig, 2006.
- [2] Jiang, Y., Chen, Q.: Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), No. 6, pp. 973–988.
- [3] McNamara, G., Zanetti, G.: Use of the Boltzmann equation to simulate lattice gas automata. *Physical Review Letters* 61 (1988), pp. 2332–2335.
- [4] D’Humières, D., Ginzburg, I., Krafczyk, M., Lallemand, P., Luo, L. S.: Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann models in three dimensions. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A* (2002), pp. 360–437.
- [5] Freudiger, S., Hegewald, J., Krafczyk, M.: A parallelisation concept for a multiphysics Lattice Boltzmann prototype based on hierarchical grids. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 8 (2008), No. 1, pp. 168–178.
- [6] Crouse, B., Rank, E., Krafczyk, M., Tölke, J.: A LB-based approach for adaptive flow simulations. *International Journal of Modern Physics B* 17 (2003), No. 1/2, pp. 109–112.
- [7] Teixeira, C.: Incorporating Turbulence Models into the Lattice-Boltzmann method. *International Journal of Modern Physics C* 9 (1998), No. 8, pp. 1159–1175.
- [8] van Treeck, C., Rank, E., Krafczyk, M., Tölke, J., Nachtwey, B.: Extension of a hybrid thermal LBE scheme for large-eddy simulations of turbulent convective flows. *Computers & Fluids* 35 (2006), No. 8/9, pp. 863–871.

- [9] *Schönherr, M., Kucher, K., Geier, M., Stiebler, M., Krafczyk, M.*: Multithread implementations of the Lattice Boltzmann method on non-uniform grids for CPUs and GPUs. *Computers and Mathematics with Applications* 61 (2011), No. 12, pp. 3730–3743.
- [10] *Bindick, S.*: Ein integrierter Ansatz zur interaktiven dreidimensionalen Simulation gekoppelter thermischer Prozesse. PhD thesis, TU Braunschweig, 2010.
- [11] *Stiebler, M., Krafczyk, M., Freudiger, S., Geier, M.*: Lattice Boltzmann Large Eddy Simulation of subcritical flows around a sphere on non-uniform grids. *Computers and Mathematics with Applications* 61 (2011), No. 12, pp. 3475–3484.
- [12] *Perera, M., Walker, R.*: Strategy for measuring infiltration rates in large, multicelled and naturally ventilated buildings using a single tracer gas. *Building Services Engineering Research and Technology* 6 (1985), pp. 82–88.
- [13] ASHRAE Standard 68-1998: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1998.
- [14] *Norrefeld, V., Nuidoui, T., van Treeck, C., Grün, G.*: Erstellung eines isothermen zonalen Modells mit Impulserhaltung. *Bausim* 2010, 2010.
- [15] *Uphoff, S., Geller, S., Krafczyk, M.*: Study of flow around a bridge cross-section with a Lattice Boltzmann LES model. *International Conference of Wind Engineering* 13, 2011.

Autoren dieses Beitrages

Dipl.-Phys. Sonja Uphoff, Prof. Dr. Manfred Krafczyk,
Dipl.-Ing. Martin Schönherr, Dipl.-Ing. Maik Stiebler
Alle:

Institut für Rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen,
TU Braunschweig, PF 3329, D-38023 Braunschweig

Dipl.-Ing. Mani Zargari

Institut für Gebäude- und Solartechnik, TU Braunschweig,
Mühlenpfordtstr. 23, D-38106 Braunschweig