

Untersuchung eines generischen Testfalls mit Lasermesstechnik zur Validierung einer Lattice-Boltzmann Berechnungsmethode

Investigation of a Generic Testcase by Means of Laser Measurement Techniques to Validate a Lattice-Boltzmann CFD-Method

A. Theis, R. Schäfer, T. Reviol, M. Böhle

Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen, Gottlieb-Daimler Straße, Gebäude 44, 67663 Kaiserslautern

Schlagworte: Lasermesstechnik, Lattice-Boltzmann Methode, Large Eddy Simulation

Key words: Laser measurement, Lattice-Boltzmann method, Large eddy simulation

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein generischer Testfall mit ablösender Strömung mit Methoden der Lasermesstechnik detailliert untersucht. Hierzu wurde eine LDA-Messung zur Aufnahme diskreter Werte und eine PIV-Methode zur Aufnahme des Strömungsfeldes verwendet. Basierend auf den Versuchsergebnissen wurde die Untersuchung des Testfalls mit numerischen Methoden durchgeführt. Zum Einsatz kamen eine neuartige Lattice-Boltzmann Methode und eine bewährte Navier-Stokes Methode. In beiden Berechnungsverfahren wurde die Turbulenzmodellierung mit dem Smagorinsky LES-Modell durchgeführt, da die Turbulenzberechnung mit höherem Modellierungsgrad zu unzureichenden Ergebnissen führt. Mit dem Vergleich der experimentellen mit den numerischen Ergebnissen wurde einerseits die neuartige Lattice-Boltzmann Methode validiert, andererseits wurde die besondere Eignung der Lattice-Boltzmann Methode für stark ablösende Strömungsfälle gezeigt.

Einleitung

Zur numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen ist der RANS-Ansatz seit vielen Jahren die am weitesten verbreitete Methode. Dieser Ansatz basiert auf der Lösung der Navier-Stokes Gleichungen und bestimmt die Turbulenz meist durch die Modellierung einer turbulenten Scheinviskosität. Da bei dieser Berechnungsmethode die Modellierungstiefe sehr groß ist, versagt die RANS-Methode, wenn die Strömung von den grundlegenden Annahmen dieser Modelle abweicht. Dies ist z.B. beim Strömungsabriss der Fall.

Um solche Fälle, die durch den RANS-Ansatz nur unzureichend erfasst werden, numerisch berechnen zu können, existieren Ansätze mit einer geringeren Modellierungstiefe. Hier zu nennen ist z.B. die Large-Eddy-Simulation (LES), die großskalige Turbulenzballen (sog. Eddies) auflöst und nur kleinskalige Eddies modelliert. Mit der Hilfe von LES-Simulationen können komplexe turbulente Strömungen in guter Genauigkeit berechnet werden. Allerdings gehen diese Methoden mit einem beträchtlichen Ressourcenaufwand hinsichtlich Rechnerleistung und CPU-Zeit einher. Als problematisch äußert sich außerdem der hoch instationäre Charakter, über den diese Berechnungsfälle meist verfügen. Eine zeitliche Auflösung von

$\Delta t = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ sind für diese Berechnungsfälle keine Seltenheit, wodurch der Ressourcenaufwand schnell in Bereiche ansteigt, die auch in Forschung und Entwicklung unpraktikabel sind. Die Lattice Boltzmann Methode (LBM) verfolgt einen alternativen Ansatz. Diese basiert auf der hierarchisch höher angesiedelten Boltzmann-Gleichung und kann z.B. in (Hänel 2004) nachgelesen werden. Die herausragenden Vorteile der LBM finden sich im einfachen Algorithmus und in der räumlichen Diskretisierung. Weiterhin sind die Anforderungen an das Rechengitter deutlich geringer und der Einsatz einer äquidistanten Punktwolke mit lokalen Verfeinerungen ist ausreichend. Daher wird bei der LBM auch von einer quasi-netzfreien Methode gesprochen. Zur Turbulenzmodellierung kann problemlos eine LES-Filterung eingesetzt werden, ohne einen signifikanten Ressourcenanstieg zu verursachen, wie dies bei Navier-Stokes Solvern der Fall ist. Aufgrund dieser Vorteile kommt die LBM immer häufiger zur Anwendung.

Motivation

Am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen der TU Kaiserslautern wurde ein solcher LBM-CFD-Code entwickelt. Dieser greift zur Turbulenzmodellierung auf einen Smagorinsky LES-Filter zurück. Zur Validierung wurden bereits mehrere Testfälle eingehend untersucht, vgl. (Conrad et al. 2013, Schneider und Böhle 2013, Schneider 2015), allerdings steht bislang die Validierung des Codes für stark ablösende Strömungen aus.

Insbesondere für diese stark ablösenden Strömungsfälle stellt die LBM eine potentielle Alternative zu den aufwändigen Navier-Stokes Lösern mit LES-Filterung dar. Dies liegt darin begründet, dass der Ressourcenaufwand bereits bei einfacher Geometrie äußerst groß ist. Da im Rahmen der Lattice-Boltzmann Methode keine partiellen Differentialgleichungen gelöst werden müssen, ist der Ressourcenaufwand im Vergleich zu den Navier-Stokes Lösern deutlich geringer.

Vorgehen

In der vorliegenden Arbeit wird ein generischer Testfall erstellt, um die Eignung des LBM-Codes für diese Strömungsfälle zu prüfen. Der generische Testfall besteht aus einer Rohrströmung, in die ein Hindernis in Form eines quadratischen Rohrprofils eingebracht wird, um ein Ablösen der Strömung zu erzwingen. Zur späteren Validierung des LBM-Codes wird der Testfall eingehend mittels Lasermesstechnik vermessen und untersucht.

Zur numerischen Untersuchung wird zunächst eine Zeitschrittstudie durchgeführt. Basierend auf dem Ergebnis dieser Studie erfolgt die finale Untersuchung. Die im Rahmen dieser Untersuchung erzeugten Datensätze liegen zeitlich hochaufgelöst vor. Diese müssen zunächst zeitlich gemittelt werden, bevor sie mit den experimentellen Daten verglichen werden können. Hierzu ist eine geeignete Zeitspanne aus Experiment und Simulation zu bestimmen, über die die Ergebnisse gemittelt werden können.

Grundlagen zur Lattice Boltzmann Methode

Die Lattice-Boltzmann Methode basiert im Gegensatz zu den Navier-Stokes-Gleichungen nicht auf einem makroskopischen Ansatz, sondern auf einem mesoskopischen Ansatz. Dieser beruht auf der molekularen Betrachtungsweise, wobei Molekülbewegungen statistisch beschrieben werden. Zur Charakterisierung der Moleküle wird eine Verteilungsfunktion herangezogen, die die Wahrscheinlichkeit beschreibt, ein Molekül mit einer bestimmten Geschwindigkeit an einer bestimmten Stelle im Raum zu finden. Diese Verteilungsfunktion ist wie folgt definiert,

$$f(x, \zeta, t) = \frac{dN}{dV \cdot d\zeta} \quad (1)$$

wobei dN für die Anzahl der Moleküle im Ortswolumen dV und Geschwindigkeitsbereich $d\zeta$ steht. Das Ortswolumen und der Geschwindigkeitsraum können als Phasenvolumen zusammengefasst werden. Die Verteilungsfunktion f kann mit Hilfe der Boltzmann-Gleichung ermittelt

werden. Diese leitet sich aus der Erhaltung der Partikel im Phasenvolumen her und ist folgendermaßen in Tensornotation definiert:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \zeta_i \cdot \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{F_i}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \zeta_i} = \Omega_K(f) \quad (2)$$

Die linke Seite von Gleichung (2) wird Transportterm genannt und beinhaltet die zeitliche, sowie konvektive Änderung der Verteilungsfunktion im Orts- und Geschwindigkeitsraum. Die rechte Seite wird als Kollisionsterm bezeichnet. Da der Kollisionsterm sich aus einem komplexen Integral zusammensetzt, wird dieser durch einen wesentlichen einfacheren mathematischen Ansatz approximiert. Häufig wird hier das sogenannten BGK-Modell nach Bhatnagar, Gross und Krook zu Grunde gelegt, dass davon ausgeht, dass jeder Nichtgleichgewichtszustand einen Gleichgewichtszustand anstrebt. Der Kollisionsterm ist demnach wie folgt definiert:

$$\Omega_K(f) = -\omega \cdot (f - f^{eq}) \quad (3)$$

ω beschreibt die molekulare Kollisionsfrequenz und gibt die Zeitspanne an, in der Übergang vom Nichtgleichgewicht zum Gleichgewicht erfolgt. f steht für die Nichtgleichgewichtsverteilung und f^{eq} für die lokale Gleichgewichtsverteilung. Die Gleichgewichtsverteilung wird mit Hilfe der Maxwell-Verteilung beschrieben. (Hänel 2004)

Um die BGK-Boltzmann-Gleichung numerisch lösen zu können, erfolgt eine Diskretisierung in Zeit, Ortsraum und Geschwindigkeitsraum. Die diskrete BGK-Boltzmann-Gleichung, die in Gl. (4) dargestellt ist, wird als Lattice-BGK-Gleichung (LBGK-Gleichung) bezeichnet.

$$f_i(x + \zeta_i \cdot \partial t, t + \partial t) = f_i(x, t) + \omega \cdot \partial t \cdot (f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t)) \quad (4)$$

Der Gleichung ist zu entnehmen, dass sich ein Berechnungsschritt aus einem Transportschritt $f_i(x, t)$ und einem Kollisionsschritt $\omega \cdot \partial t \cdot (f_i^{eq}(x, t) - f_i(x, t))$ zusammensetzt. Algorithmisch werden diese beiden Schritte meist separat für jede Geschwindigkeit ζ_i in jedem Gitterpunkt sowie Zeitschritt berechnet. In einem expliziten Vorgehen kann so die neue Verteilungsfunktionen $f_i(x, t)$ für den nächsten Zeitschritt $t + \partial t$ bestimmt werden. (Hänel 2004)

Ist die Verteilungsfunktion $f(x, \zeta, t)$ bekannt, kann mit Hilfe der Bestimmung der Momente die interessierenden makroskopischen Größen ermittelt werden. Folgende Gleichungen zeigen beispielhaft die Momente für die Berechnung der Dichte und Geschwindigkeit auf makroskopischer Ebene:

$$\rho(x, t) = \sum_{i=1}^{q-1} f_i(x, t) \quad (5)$$

$$\rho \cdot u(x, t) = \sum_{i=1}^{q-1} \zeta_i \cdot f_i(x, t) \quad (6)$$

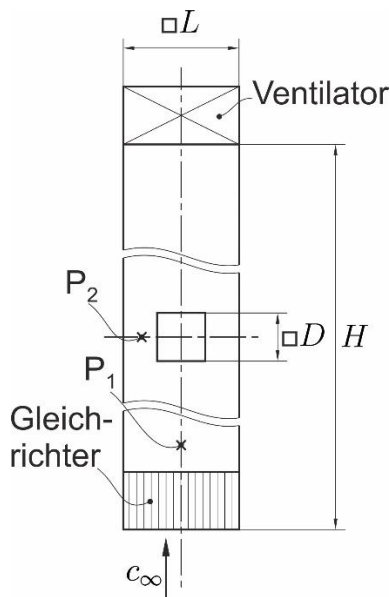
Versuchsaufbau und Experimentelle Untersuchungen

Die Simulationsergebnisse werden mittels Particle Image Velocimetry (PIV) validiert. Hierfür wird ein konventionelles Lasersystem verwendet. Bei dem Laser handelt es sich um einen Nd-Yag Dual Power Laser mit einer Pulsdauer von 5 ns der Firma DANTEC Dynamics. Außerdem wird eine CCD-Kamera vom Typ Flow Sense EO 4MPixel mit einem Objektiv von Nikon der Brennweite 35 mm verwendet.

Eine Überprüfung des Volumenstroms wird durch die Messung der Geschwindigkeit an einem Punkt in der Mitte des Strömungsgebiets umgesetzt. Hierzu wird ein LDA-Laser, Flow Explorer 2D, für eine 2D-Messung verwendet. Der Laser ist ebenfalls von der Firma DANTEX Dynamics.

Die Messungen zur Validierung der Simulationsergebnisse werden an einem Prüfstand, der aus einem Vierkanthrohr aus Plexiglas besteht durchgeführt. Das Rohr hat eine Höhe H von 1000 mm und ein Innenmaß L von 100x100 mm. Am Rohreinlass ist ein Wabengleichrichter verbaut, um eine möglichst ungestörte und drallfreie Strömung zu realisieren. In der Mitte des Rohres ist quer zur Strömungsrichtung ein Vierkanthrohr als Prüfkörper mit den Außenmaßen D 30x30 mm in die Messstrecke eingebracht, siehe Abbildung 1a.

Ein Axialventilator, der am Ende des durchströmten Zylinders angebracht ist, saugt die Luft vor dem Wabengleichrichter aus der Umgebung an. In Abbildung 1b ist der Prüfstand, an dem die Messungen durchgeführt werden zu sehen.



(a) Schematische Darstellung



(b) Fotografische Darstellung

Abb. 1: Versuchsaufbau als schematische und fotografische Darstellung

Außerdem sind in Abbildung 1a die Punkte P_1 und P_2 zur Messung der Geschwindigkeit mittels eines LDA-Lasers angegeben. An der unteren Messstelle wird zur Bestimmung des Massenstroms die Geschwindigkeit in der Mitte des Rohres auf einer Höhe von 170 mm gemessen. Zusätzlich wird für eine weitere Überprüfung die Geschwindigkeit an einem zweiten Punkt in Höhe von 530 mm mittig in dem Spalt zwischen dem als Störstelle eingebrachten Vierkanthrohr und der Wand gemessen. In dem Messvolumen wird bei einer Geschwindigkeit von $3,75 \text{ m/s}$ eine Reynoldszahl von $2,69 \cdot 10^4$ bezogen auf den Zylinderquerschnitt erreicht.

Die Kamera wird mit einem Abstand von 275 mm zur Mitte des Messvolumens positioniert. Für die Aufnahmen wird eine mittlere Blende von 8 gewählt. Der Laser steht mit einem Abstand von 550 mm zum Messvolumen. Die erzeugte Laserlichtebene hat eine ungefähre Dicke von 2 mm. Um die Bildgröße für die Auswertung zu vergrößern, werden Bilder auf zwei unterschiedlichen Höhen aufgenommen. Der Höhenversatz beträgt 75 mm. Anschließend werden die Bilder für das Postprocessing mit dem Programm Dynamic Studio 2015a aneinandergesetzt und ausgewertet. Für die Lasermessungen werden im Laserlicht reflektierende Partikel in der Strömung benötigt. Hierfür wird Nebelfluid durch Druckluft zerstäubt und vor dem Wabengleichrichter in die Strömung im Messvolumen eingebracht. Die erzeugten Partikel haben eine ungefähre Größe von $2 \mu\text{m}$.

Die zeitliche Auflösung des Systems ist für die bei großen Reynoldszahlen stark instationäre Strömung nicht ausreichend, so dass zur Validierung die Messdaten gemittelt ausgewertet werden. Hierfür werden bei jeder Kameraposition 100 Bilder zu je zwei Frames gemacht. Die beiden Frames werden mit einem zeitlichen Abstand von $0,24 \text{ s}$ aufgenommen. Insgesamt wird über einen Zeitraum von 23 s gemittelt. Zur Berechnung eines Vektorplots wird für jedes

zu untersuchende Gebiet von 16 x 16 Pixel gewählt. Die Überlappung zwischen den einzelnen Gebieten beträgt 25 %. Zusätzlich wird ein Low-Pass-Gauss-Filter angewandt. Die Vektorgrafiken werden gemittelt und zu einer Vektorgrafik zusammengefügt. Aus der gemittelten Vektorgrafik wird ein Konturplot für die Geschwindigkeit erstellt, der mit den gemittelten Ergebnissen aus der Simulation verglichen wird.

Numerische Untersuchungen

Die numerischen Untersuchungen werden mit dem inhouse-Code SAM-Lattice durchgeführt. Um die Methoden der numerischen Modellierung und die hiermit erzielten Simulationsergebnisse zu validieren, erfolgt neben dem Vergleich mit berührungsfreien Messmethoden ebenfalls der Abgleich mit CFD-Ergebnissen, die mit der Navier-Stokes-Methode ermittelt werden. Hierzu kommt die frei zugänglichen Software OpenFOAM in der Version 17.06 zum Einsatz. Um eine möglichst große Vergleichbarkeit zwischen der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) und der Navier-Stokes-Methode (NSM) zu erreichen, wird das numerische Setup möglichst präzise definiert und in den einzelnen Methoden entsprechend umgesetzt. Im Folgenden wird daher zunächst das numerische Setup erläutert, bevor die spezifischen Einstellungen der verschiedenen Methoden vorgestellt werden.

Numerisches Setup

Das Diskretisierungsgebiet des numerischen Modells umfasst den vollständigen Versuchstand, vgl. Abbildung 1. Da der Versuchstand Luft aus der Umgebung ansaugt, wird angenommen, dass infinitesimal vor dem Eintritt ein Rechteckprofil vorliegt und sich die Grenzschicht analog zu einer ebenen Platte im Innern des Kanals ausbildet. Mit Hilfe von zuvor durchgeführten LDA-Messungen, kann am Eintritt eine mittlere Geschwindigkeit von $c=3,75\text{ m/s}$ ermittelt werden. Diese wird als Randbedingung am Eintritt aufgeprägt. Der Austritt wird mit einer Totaldruckrandbedingung im Navier-Stokes Löser und mit einer Druckgleichgewichtsrandbedingung im Lattice-Boltzmann Code modelliert. Die Wände werden als glatt mit Wandhaftung angenommen.

Da sich die durchgeführten Untersuchungen im Unterschallbereich befinden, wird in der numerischen Untersuchung von einer schwach kompressiblen (quasi inkompressibel) Luftströmung ausgegangen. Die Viskosität wird mit $\nu = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ und die Dichte mit $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ festgelegt.

Turbulenz wird sowohl in der LBM, als auch in der NSM mit dem SGS-Modell nach Smagorinsky und die Dämpfung der turbulenten Länge nach van Driest abgebildet.

Zur zeitlichen Auflösung des physikalischen Problems wird ein Zeitschritt von $\Delta t \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ definiert. Der Zeitraum der zeitlichen Mittelung orientiert sich an der Messdauer der PIV-Messungen, und an Ressourcenaufwand der eingesetzten Methoden.

Aufgrund des unterschiedlichen Lösungskonzepts der zu Grunde liegenden Gleichungen beider Methoden, lässt sich prinzipbedingt kein analoges Vorgehen in der numerischen Diskretisierung der mathematischen Formulierung wählen. Prinzipiell werden soweit möglich Lösungsmethoden gewählt, die über einen Abbruchfehler von mindestens zweiter Ordnung verfügen.

Untersuchungen mit Navier-Stokes Löser

An das Rechengitter einer LES-Simulation werden aufgrund der Auflösung großskaliger eddies hohe Anforderungen gestellt. Zur Orientierung bei der Netzerstellung sind die dimensionslosen Abstände der ersten Wandzelle von großer Bedeutung. In der Literatur werden verschiedene Größenordnungen für die Größen Δx^+ , Δy^+ und Δz^+ angegeben. Hierbei beschreibt die x -Koordinate die Hauptströmungsrichtung und die y -Koordinate die Richtung senkrecht zur

Wand. Bewegungen in lateraler Richtung werden durch die z -Koordinate beschrieben. In dieser Arbeit erfolgt die Wahl der Werte in Anlehnung an (Fröhlich 2006). Folglich werden bei der Erstellung des Rechengitters für die wandauflösende LES Werte von $\Delta x^+ = 50$, $\Delta y^+ = 2$ und $\Delta z^+ = 15$ angestrebt. Neben Richtwerten für die dimensionslosen Abstände existieren in der Literatur ebenfalls Empfehlungen für die Zellanzahl je Volumen δ^3 - wobei δ die Grenzschichtdicke ist. Diese bewegen sich im Bereich von $N_x = 5 - 32$, $N_y = 16 - 32$ und $N_z = 15 - 32$. Bei der Erstellung des Rechengitters für den hier untersuchten Fall werden die angegebenen Werte berücksichtigt. Das so erstellte Netz besteht aus ca. 10 Mio. Hexaederelementen. Im Rahmen einer Netzstudie wird weiterhin ein Netz mit ca. 29 Mio. und mit nur ca. 1 Mio. Zellen erstellt. Beide Netze haben sich jedoch als nicht geeignet herausgestellt. Infolge des großen Rechengitters wird der Strömungsfall parallelisiert unter Verwendung von 128 CPUs berechnet. Trotz der großen Anzahl an CPUs beträgt die Rechendauer ca. 3,5 Tage zur Generierung einer Startlösung. Basierend auf der Startlösung werden weitere 1,5 Tage benötigt, um eine ausreichend langen Zeitspanne Δt zu untersuchen, über die eine Mittelung der Strömungsgrößen durchgeführt werden kann. Die gesamte Rechendauer beläuft sich auf ca. 5 Tage. Um den Ressourcenaufwand zu begrenzen, wird die finale NSM-Untersuchung mit LES-Modellierung nur bis zu einer physikalischen Zeit von $t = 0,694$ s durchgeführt. Die Mittelung der Strömungsgrößen erfolgt über das Zeitintervall von $\Delta t = 0,234$ s.

Untersuchungen mit der Lattice Boltzmann Methode

Aufgrund dessen, dass die Lattice Boltzmann Methode mit äquidistanten Gittern arbeitet, ist der zeitliche Aufwand für die Netzerstellung deutlich reduziert. Da sich die Gitterverfeinerung, in dem inhouse Code Sam-Lattice zurzeit noch in Entwicklung befindet, kann diese nicht genutzt werden. Damit der Ressourcenaufwand dennoch in einem angemessenen Rahmen bleibt, wird eine Gitterweite im gesamten Strömungsgebiet von 1 mm eingestellt. Die Anzahl der Latticezellen beläuft sich damit auf ca. 10 Mio.

Bei der Lattice-Boltzmann Methode sind Zeitschritt und Gitterweite miteinander gekoppelt. Durch die Gitterweite $\Delta x = 1\text{mm}$, Simulationsmachzahl $Ma = 0,1$ sowie der maximal zu erwartenden Geschwindigkeit $u_{max} = 10\text{ m/s}$ ist der Zeitschritt Δt festgelegt:

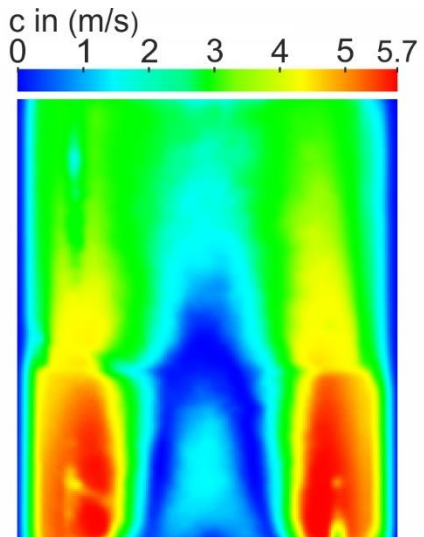
$$\Delta t = \frac{\Delta x \cdot Ma}{u_{max} \cdot \sqrt{3}}$$

Es wird eine Laufzeit der Strömung von ca. 11,5 s verfolgt, wobei die Zeit bis zum konvergierten Zustand ca. 2,3 sec beträgt. In Zeitschritten ausgedrückt entspricht die gesamte Laufzeit 2 000 000 Zeitschritten. Die Rechenzeit beträgt ca. 2,5 Tage, wobei parallelisiert auf 128 Prozessoren gerechnet wird. Die Ergebnisse werden zur Vergleichbarkeit mit der OpenFOAM und PIV-Messungen über ein Zeitintervall von $\Delta t=1,0$ s gemittelt.

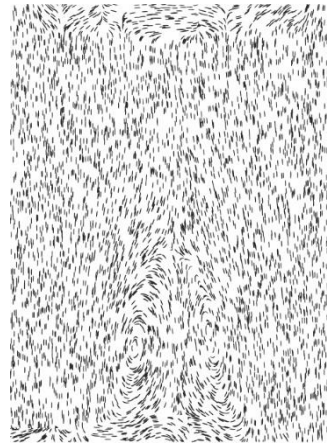
Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die experimentellen und numerischen Ergebnissen über den jeweils angegebenen Mittelungszeitraum dargestellt. Abbildung 2a zeigt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit als Konturplot der PIV-Messung. Zum Vergleich ist in Abbildung 2b der Strömungsverlauf als normierter Vektorplot zu sehen.

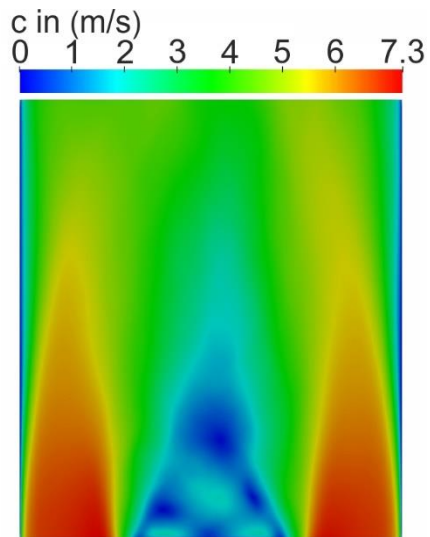
Entsprechend der gezeigten Ergebnisse der PIV-Messung sind in Abbildung 2c, bzw. Abbildung 2d die Resultate für den Konturplot und den Vektorplot der Open-FOAM Berechnungen, sowie in Abbildung 2e, bzw. Abbildung 2f die der Sam-Lattice Simulation dargestellt.



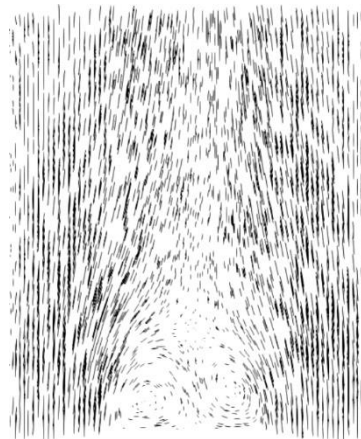
(a) Konturplot PIV-Messung



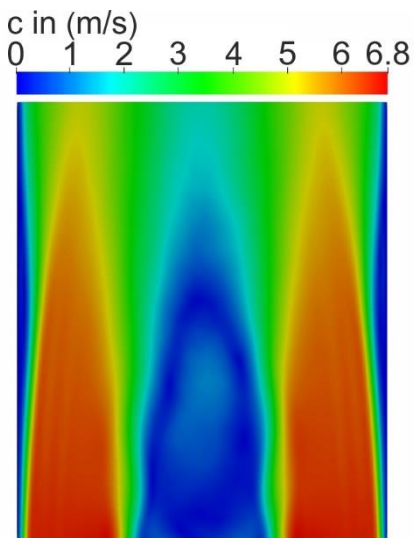
(b) Vektorplot PIV-Messung



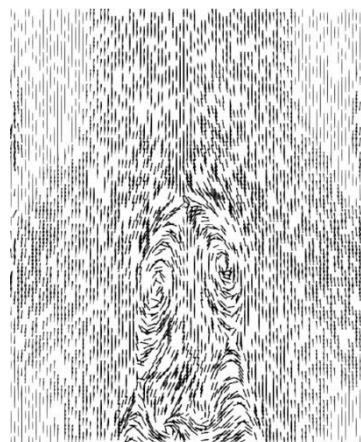
(c) Konturplot Navier-Stokes Löser



(d) Vektorplot Navier-Stokes Löser



(e) Konturplot LBM



(f) Vektorplot LBM

Abb. 2: Untersuchungsergebnisse

Ursache für die Unstetigkeit im Konturplot der Messung findet sich durch das Aneinandersetzen der Bilder, die an unterschiedlichen Kamerapositionen aufgenommen wurden, um den Bereich für die Auswertung zu vergrößern.

Ein Vergleich der in den Abbildungen 2a, 2c und 2e dargestellten Geschwindigkeiten zeigt, dass die Struktur der Strömung in allen drei Abbildungen ähnlich ist. In den Abbildungen sind durch die statistische Mittelung die typischen Wirbelstrukturen, die bei einer Kármánschen Wirbelstraße auftreten nicht mehr sichtbar. Übereinstimmend ist in den drei Abbildungen ein Gebiet mit größeren Geschwindigkeiten zu sehen und die gemittelte Wirbelschleppe mit geringeren Geschwindigkeiten hinter der Störstelle. Bei der Betrachtung der maximalen Geschwindigkeit fällt auf, dass die Geschwindigkeit im Experiment am niedrigsten und in der NSM-LES-Simulation am größten ist. Die Ergebnisse der LBM-Rechnung stimmen somit besser mit denen aus der Messung ermittelten Ergebnissen überein.

Eine Möglichkeit für die Ursache der Unterschiede könnte durch die Randbedingung in der Simulation für hydraulisch glatte Wände resultieren. Eine Berechnung der Wandrauigkeit zeigt, dass einige Rauheitsspitzen nicht in der Grenzschicht liegen und die numerischen Berechnungen somit mit einem größeren Rauheitswert berechnet werden müssten.

In den Abbildungen 2b, 2d und 2f ist ein Vektorplot der Strömung im Nachlauf des Zylinders zu sehen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus dem Konturplot, sind hier die Struktur und die Wirbel der Strömung zu erkennen. Diese stimmen von der Lage und Größe in den Abbildungen der Ergebnisse der LBM-Rechnung und der Messung sehr gut überein. Die Ergebnisse der NSM-LES weichen stärker in ihrer Struktur von der Messung ab. Dies liegt möglicherweise an der kürzeren physikalischen Zeit über die gemittelt wurde, da die Wirbelschleppe in Abbildung 2c und 2d noch besser zu erkennen ist als in den Abbildungen für die LBM und die PIV-Messung.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Vergleich der LBM-Simulation mit der Navier-Stokes Simulation, sowie der Validierung mit den PIV-Messung konnte gezeigt werden, dass der inhouse-Code für die Lattice-Boltzmann-Methode auch für Reynoldszahlen der Größenordnung 10^5 angewandt werden kann. Somit ist der Code auch für ablösende instationäre Strömungen geeignet.

Ein Vorteil der LBM ist zudem die mit 2,5 Tagen deutlich kürzere Rechenzeit gegenüber der OpenFOAM Simulation, die 5 Tage dauert, bei gleichzeitig kürzerer physikalischer Untersuchungszeit. Somit stellt sich die LBM als geeignete Alternative zu den üblichen NSM-Lösern dar.

Dankesworte

Die numerischen Untersuchungen wurden auf dem rheinland-pfälzischen Hochleistungsrechner "Elwetritsch" ausgeführt.

Literatur

Conrad, D., Schneider, A., Böhle, M., 2013: „Numerical Investigation of an extended Propellerviscometer by Means of Lattice Boltzmann Methods“, Proceedings of the ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting.

Fröhlich, J., 2006: „Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen“. Teubner.

Hänel, D., 2004: „Molekulare Gasdynamik“, Springer.

Schneider, A., 2015: “A Consistent Large Eddy Approach for Lattice Boltzmann Methods and its Application to Complex Flows”. PhD thesis, Technische Universität Kaiserslautern.

Schneider, A., Böhle, M., 2013: “Lattice Boltzmann Simulation of the Flow Field in Pump Intakes - A new Approach”, ASME J. Fluids Eng. 137: 031105\1-031105\10