

Diss. ETH No. 20658

Particle Dispersion in Homogeneous Isotropic Turbulence

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
THOMAS BURGNER
Dipl. Phys. ETH, ETH Zurich

born 1.12.1983

citizen of
Saas-Balen (Wallis)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. J. Herrmann, examiner
Prof. Dr. P. Jenny, co-examiner

2012

Zusammenfassung

Das Verständnis von Turbulenz ist eine der letzten grossen offenen Fragen der klassischen Physik. Obwohl die Bewegungsgleichung der Fluidodynamik, die Navier-Stokes Gleichung, bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt ist, bleibt die Frage nach einer exakten Lösung dieser Gleichung unbeantwortet. Aufgrund der chaotischen Natur von Turbulenz ist auch das Bestimmen von approximativen Lösungen der Navier-Stokes Gleichung oft schwierig. Das Problem wird noch komplizierter, wenn zusätzlich kleine Teilchen, welche im Fluid mittransportiert werden, mit in Betracht gezogen werden. Das Verhalten dieser Teilchen in der Strömung kann höchst komplexe Eigenschaften zeigen und eine präzise Beschreibung dieser Phänomene ist noch immer anspruchsvoll.

Basierend auf stochastischen Prozessen wird in dieser Dissertation ein neues numerisches Modell vorgestellt, welches zur Untersuchung von Dispersion und Mischung von Teilchen in Turbulenz verwendet wird. Die Bewegung von einzelnen Teilchen wird dabei mit der diskreten Elemente Methode simuliert und Teilchenkollisionen werden durch das «linear spring-dashpot» Modell beschrieben. Weiter werden die Teilchen mit Hilfe eines empirischen Gesetzes für die Strömungswiderstandskraft an ein turbulentes Geschwindigkeitsfeld gekoppelt.

Das Geschwindigkeitsfeld des Fluids wird im ersten Teil der Arbeit durch stochastische Prozesse in der Form von stochastischen Differentialgleichungen berechnet. Diese Prozesse sind in der Zeit korreliert,

jedoch existiert keine Korrelation im Raum. Mit diesem Modell wird das Mischen von zwei Teilchensorten in einem turbulenten Kanal untersucht. Es wird gezeigt, dass die Mischungsrate unabhängig von der Reynoldszahl wird für $R_\lambda \gtrsim 300$. Der Einfluss der Teilchendichte wird ebenfalls untersucht.

In einem nächsten Schritt werden räumliche Korrelationen zwischen den einzelnen stochastischen Prozessen durch das Minimieren einer Heisenberg-artigen Hamiltonfunktion in das Modell integriert. Das Modell richtet die Geschwindigkeitsvektoren von einzelnen Fluidteilchen so aneinander aus, dass die Strukturfunktionen der Geschwindigkeit die experimentell gemessenen Potenzgesetze erfüllen. Durch Messung der mittleren quadrierten Distanz (mean square displacement) wird die Dispersion von einzelnen Teilchen studiert und die gewünschten quadratischen wie auch linearen Bereiche werden dabei gesehen. Die Dispersion von Teilchenpaaren wird durch den mittleren quadrierten Abstand (mean square separation) charakterisiert und ein quadratischer wie auch linearer Bereich wird dabei gefunden. Hinweise auf ein Richardson t^3 Gesetz können ebenfalls beobachtet werden.

Im letzten Teil der Arbeit wird anstelle der stochastischen Prozesse eine Lattice-Boltzmann Simulation mit einem spektralen Forcing verwendet, um ein turbulentes Geschwindigkeitsfeld zu berechnen. Mit dieser Methode wird der Einfluss von inelastischen Stößen zwischen Teilchen auf das Auftreten von «preferential concentration» untersucht. Dabei wird gezeigt, dass dissipative Teilchenkollisionen bereits bei kleinen Teilchendichten und geringer Dissipation eine wichtige Rolle spielen.

Summary

The understanding of turbulence is still a longstanding open question of classical mechanics. Even though the governing equations of motion were already formulated in the 19th century in the form of the Navier-Stokes equations, an exact solution to them is even today not known. Due to the chaotic behavior of turbulence even approximate solutions are difficult to obtain. The problem becomes even more complex if small particles carried along with the fluid are included into the deliberations. These particles can show rather complex behavior and an accurate description of these effects is still challenging.

In this work a new numerical model based on stochastic processes is presented and used to investigate the dispersion and mixing of particles in turbulence. It is based on a discrete element model to simulate the trajectories of single particles, and particle collisions are modeled with a linear spring-dashpot model. The particles are then coupled to a turbulent fluid velocity field by an empirical drag law.

In a first approach the fluid velocity field is calculated by stochastic processes in the form of stochastic differential equations. These processes are self-correlated in time and, at first, they are not correlated in space. With this model the mixing of two species of particles in a turbulent channel flow is investigated. It is shown that the mixing rate becomes independent from the Reynolds number at the Taylor microscale R_λ for $R_\lambda \gtrsim 300$. The influence of the particle density on the mixing is studied as well.

Next, spatial correlations between the stochastic processes are introduced by minimizing a Heisenberg-like Hamiltonian. The model aligns individual fluid particle velocities such that the spatial velocity structure functions obey the experimentally observed power laws. By measuring the mean square displacement the dispersion of single particles is investigated and the desired quadratic and linear regimes are observed. Then the dispersion of pairs of particles is examined by measuring the mean square separation. The quadratic Batchelor regime at short times and the linear regime at long times is observed. Evidence for a Richardson t^3 law can also be observed for large R_λ and short initial distances.

In the last part of the work a different approach for simulating the fluid velocity field is taken by using a Lattice-Boltzmann simulation with a spectral forcing method. With this method the influence of dissipative particle collisions on the preferential concentration and the clustering of particles due to collisional cooling is studied. It is shown that already at rather small volume fractions and low dissipation the influence of inelastic particle collisions is important.