

**Dipl. Phys. Frank Rietz**

## **Deutsche Zusammenfassung: Convection and segregation of beads in a flat rotating box**

Konvektion und Entmischung von Kügelchen in einem flachen rotierenden Behälter

Körnige Materialien sind allgegenwärtig in der Industrie und im täglichen Leben. Deren Handhabung ist nicht einfach, da sie unter externer Energiezufuhr zur Entmischung neigen. Eine optimale Durchmischung spielt jedoch eine wichtige Rolle, z.B. bei der Verarbeitung von Lebensmitteln und partikelförmigen Chemikalien.

Die kontinuierlich gedrehte horizontale Trommel, die mit verschiedenen Arten von Partikeln gefüllt ist, dient als eines der Standard-Systeme um die Segregation granularer Materie zu studieren. Seit den wegweisenden Arbeiten von Oyama im Jahre 1939, hat eine Vielzahl von Studien die Bildung von axial getrennten Bändern in langen Trommeln behandelt.

In der Dissertation wurde gezeigt, dass unter verschiedenen Bedingungen konvektive Strömungen in fast vollständig gefüllten rotierenden dünnen Behältern gefunden werden können. Diese Art von Musterbildung wurde bisher bei früheren Studien übersehen und könnte relevant sein für Situationen, in denen die Partikelbewegung beschränkt ist (z.B. bei unterirdischen Prozessen). Der Mechanismus ist noch nicht vollständig geklärt, aber es ist offensichtlich, dass eine andere Erklärung als für vibrierte granulare Mischungen gefunden werden muss.

Einige Merkmale der Konvektionsstrukturen wurden eindeutig identifiziert. Sie treten in einem begrenzten Füllstandsbereich der Zelle auf, aber sie sind anderweitig nicht sehr empfindlich gegenüber der Zusammensetzung des Granulats, solange Kristallisation vermieden wird. Die Muster bilden sich unter atmosphärischem Luftdruck, aber auch bei niedrigem Druck von wenigen Pascal. Sie sind ebenso präsent, wenn das gesamte Experiment unter Wasser durchgeführt wird. Der anfängliche Zustand der Granulatmischung ist für die Bildung der Konvektionswalzen nicht relevant. Gleichmäßig gemischte oder vollständig segregierte Ausgangszustände führen zu qualitativ ähnlichen Konvektionsmustern.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um die Wellenlänge des Musters und deren Aussehen zu manipulieren. Zum Beispiel kann eine spezielle Höhenstrukturierung für eine oder beide Zellränder verwendet werden, um eine bestimmte Wellenlänge des Musters zu erreichen. Wenn die anfängliche Höhe des Granulats lokal moduliert ist, kann erzwungen werden, dass die Konvektion in bestimmten Regionen der Zelle startet.

Eine weitere interessante Eigenschaft der Rollen ist, dass sporadische oder kontinuierliche Drehrichtungsumkehrungen des Behälters die konvektiven Strömungen nicht umkehren, sondern die Konvektionsstruktur unverändert lassen. Dies bedeutet, dass unabhängig von der Drehrichtung der Zelle, die lokale Strömung des Konvektionsmusters in gewissen Modifikationen der Packungsstruktur entlang der Zelle kodiert sein muss.

In Zellen mit Seitenverhältnis nahe eins, wurden Einzel-Rollen gefunden. Deren Dynamik ist ganz anders als bei Multi-Rollen. Das Zusammenspiel aus Segregation und Zirkulation der Kügelchen führt

zu selbstorganisierten Modulationen der Strömungsgeschwindigkeit. Spontane Umkehrungen und Unterbrechungen des Flusses sowie Schwingungen der Strömungsamplitude werden beobachtet.

Segregierte Wanderwellen können in halb gefüllten Behältern beobachtet werden. Die segregierten Bänder zeigen eine deutliche periodische raum-zeitliche Dynamik. Im Laufe der langen Laufzeit des Experiments, schaltet das System zwischen verschiedenen oszillatorischen Zuständen, die über viele Perioden stabil sind. Die beobachtete Periodizität in der Dynamik widersteht bislang jeder theoretischen Erklärung.

Neben dreidimensionalen Untersuchungen wurden auch in zweidimensionalen Monolagen Segregation und Konvektions-Szenarien gefunden. Wegen des leichteren experimentellen Zugangs bei vergleichbarer Komplexität der Muster bietet sich ein zweidimensionales System als Kandidat für zukünftige Studien an.

Zwei Mechanismen wurden für die Konvektion vorgeschlagen. Sie gehen davon aus, dass entweder kleine Höhenunterschiede oder Schwankungen in der Packungsdichte mit der globalen Strömung koppeln. Allerdings konnten die Modelle nicht mit den verfügbaren Daten getestet werden.

Zusammenfassend gesagt, wurde das Verhalten von Kügelchen in einer rotierenden flachen Zelle unter verschiedenen Aspekten charakterisiert. Viele Details sind noch nicht vollständig verstanden. Die Rolle der fluidisierten Zonen und die teilweise Trennung der Mischung bei der Konvektion sollte näher untersucht werden. Ausgeklügelte Tomographie- und Tracking-Messungen sollten durchgeführt werden, um Informationen über Einzelteilchen zu erhalten.

**Dipl. Phys. Frank Rietz**

**Englische Zusammenfassung: Convection and segregation of beads in a flat rotating box**

Granular materials are ubiquitous in industry and daily life. Their handling is not easy as they tend to segregate under external energy input. However, optimal mixing plays an important role, e.g. in the processing of food and particulate chemicals.

The continuously rotated horizontal drum filled with different kinds of particles serves as one of the standard systems in granular matter physics to study segregation. Since the pioneering work of Oyama in 1939, a variety of studies have dealt with the formation of axially segregated bands in long mixers. In the thesis it was demonstrated that convective flow can be found in almost completely filled rotated thin cells under various parameter conditions. This type of pattern formation was so far overseen by previous studies and might be relevant for situations where fluidization is restricted (e.g. in subsurface processes). Its mechanism is still not completely resolved, but it is obvious that a different explanation than for vibrated granular mixtures has to be found.

Some features of the convection structures have been clearly identified. They appear for a limited range of fill levels of the cell, but they are otherwise not very sensitive to the composition of the granular material as long as crystallization is avoided. The patterns form under atmospheric pressure in air, but they are also present under low pressure down to a few Pascal, and they are equally present when the complete experiment is submersed in water. The role of the initial preparation of the mixture for the formation of the convection rolls is not relevant. A uniformly mixed or a completely segregated initial preparation, led to qualitatively similar convection patterns.

There are several opportunities to manipulate the pattern wavelength and appearance. For example, a special structuring of one or both of the cell edges can be used to imprint a certain pattern wave length. When the initial fill height of the cell is locally modulated, the convection pattern can be forced to start in predetermined regions of the cell.

Another interesting property of the rolls is that sporadic or continuous reversals of the rotations sense do not reverse the convective flows, but rather leave the convection structure unchanged. This means that the local flow structure of the convection pattern must be encoded in the particular arrangement of the grains in different parts of the cell, irrespective of the direction of cell rotation.

In cells with aspect ratio close to one, single rolls were found. Their dynamics are completely different from multi-roll arrays. An interaction of segregation and circulation leads to self-organized modulations of the flow velocity. Spontaneous reversals and cessations of the flow and oscillations of its amplitude are observed.

Traveling wave segregation can be observed in half filled containers. Their dynamics show a pronounced spatiotemporally periodic drift of segregated patterns. In the course of long experiment durations, the system switches between different oscillatory states that are stable over many periods. The observed periodicity in the dynamics resists so far any theoretical explanation.

Besides in three-dimensional studies also in two-dimensional monolayers were found segregation and convection scenarios. Because of the easier experimental access at comparable pattern complexity a two-dimensional system seems to be a favorable candidate for future studies.

Two mechanisms were suggested for the convection. They assume that either small height differences or packing density fluctuations couple to the global vortex flow. However the models could not be tested from the available data.

Summarizing, even though the behavior of beads in a rotating flat cell was characterized in different aspects, many details are not yet fully understood. The role of the fluidized zones and the partial segregation of mixtures during the convection process should be studied in more detail. Elaborated tomography and tracking studies should be performed to achieve information on single particle level.