

---

# Local Mechanical Properties of Granular Media

---

## Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Sebastian Pitikaris

aus Hofgeismar

Köln, 2017

Berichtersteller:  
(Gutachter)

Prof. Dr. Matthias Sperl  
Prof. Dr. Andreas Schadschneider

Tag der mündlichen Prüfung:

26. Juni 2017



## ABSTRACT

Granular materials consist of athermal conglomerates of macroscopic particles which interact via dissipative short-range potentials. The global behaviour of large granular systems away from a transition can be described quite well by conventional continuum mechanics. For smaller system sizes, unusual properties appear which originate from the macroscopic scales of the constituent particles. In this thesis, we will investigate the micromechanical response of granular media in different physical conditions. We therefore use techniques to track the structural and mechanical properties of the packings on the grain scale. The dynamics of granular media strongly depends on the external driving conditions. We built setups to expose granular particles to different states of aggregation. We then probe the micromechanical response of the systems to external stresses. In a first experiment, a macroscopic stress field is applied to a granular solid through isotropic compression. We evaluate the micromechanic response by refining current techniques of stress-birefringence measurements. This provides access to the distribution of contact forces in the system. We also analyse the linked distribution of local moduli in a coarse-graining approach which relates local structural and mechanical properties of the material. For crystalline structures we find a narrow distribution of moduli. In contrast, amorphous media shows heterogeneous mechanical properties on microscopic scale. The distribution becomes more homogeneous for higher compression states. As we vary mixture compositions we can attribute the level of heterogeneity to the amount of disorder in the packing. In a second experiment, we expose granular particles to strong external driving which induces a fluidlike dynamics. We probe the micromechanic response by a local perturbation with an intruder. We measure the viscosity of the system by tracking the intruders motion. We demonstrate access to three viscosity regimes: linear response, shear thinning and shear thickening; depending on the shear rate. We attribute the effect of shear thinning to a decrease of entropic forces from the bath when the intruder is fast enough to break cages. Shear thickening appears due to the formation of particle clusters in front of the intruder for very high velocities. In a third experiment, granular particles show gaseous dynamics when exposing them to a zero gravity environment. We find that the long time cooling behaviour is in accordance with Haff's law. By tracking the particles' motion we furthermore see indications for clustering.

## KURZZUSAMMENFASSUNG

Granulare Materie besteht aus athermischen Ansammlungen makroskopischer Teilchen, welche mittels diszipativen, kurzreichweitigen Potentialen wechselwirken. Das globale Verhalten von großen granularen Systemen abseits eines Übergangs kann gut durch konventionelle Kontinuumsmechanik beschrieben werden. Auf kleineren Systemgrößen entstehen ungewöhnliche Eigenschaften, die ihren Ursprung in der makroskopischen Größenordnung der Teilchen haben. In dieser Arbeit werden wir die mikromechanische Antwort von granularen Medien in unterschiedlichen physikalischen Zuständen untersuchen. Wir nutzen hierzu Techniken, die die Beobachtung der strukturellen und mechanischen Eigenschaften auf Teilchenebene ermöglichen. Die Dynamik von granularen Medien hängt stark von der externen Anregung ab. Wir haben experimentelle Aufbauten realisiert, die granulare Teilchen unterschiedlichen Aggregatzuständen aussetzen. Wir untersuchen dann die mikromechanische Antwort des Systems auf extern angelegte Spannungen. In einem ersten Experiment wird ein makroskopisches Spannungsfeld auf einen granularen Festkörper mittels isotroper Kompression angelegt. Wir berechnen die mikromechanische Antwort, indem wir geläufige Messtechniken im Bereich der Spannungsdoppelbrechung anwenden und verfeinern. Hiermit erhalten wir die Kontaktkräfte im System. Wir analysieren weiterhin die verknüpfte Verteilung von lokalen Modulen mittels eines coarse-graining Ansatzes. Hierbei werden strukturelle und mechanische Eigenschaften des Materials miteinander in Beziehung gesetzt. Wir finden für kristalline Strukturen eine schmale Verteilung von Modulen. Demgegenüber zeigen amorphe Medien heterogene mechanische Eigenschaften auf Teilchenebene. Die Verteilung wird homogener für höhere Kompressionszustände. Wir verändern die Zusammensetzung der Mischungen und können damit den Grad an Heterogenität der Höhe der strukturellen Unordnung in der Packung zuordnen. In einem zweiten Experiment setzen wir granulare Teilchen starker externer Anregung aus. Dadurch wird eine fluid-ähnliche Dynamik erzeugt. Wir prüfen hier die mikromechanische Antwort durch eine lokale Störung durch einen Intruder. Wir messen die Viskosität des Systems, indem wir die Bewegung des Intruders verfolgen. Wir können drei Regime nachweisen: ein lineares Regime, Scherverdünnung und Scherverdickung; abhängig von der Scherrate. Wir führen den Effekt der Scherverdünnung auf eine Abnahme entropischer Kräfte aus dem Bad zurück, die einsetzt, sobald der Intruder schnell genug ist, um Käfige zu durchbrechen. Scherverdickung kann der Entstehung von Teilchenclustern vor dem Intruder bei hohen Geschwindigkeiten zugeschrieben werden. In einem dritten Experiment zeigen granulare Teilchen eine gasförmige Dynamik, indem sie Schwerelosigkeit ausgesetzt werden. Wir zeigen, dass das Langzeitabkühlverhalten in Übereinstimmung mit dem Gesetz von Haff steht. Indem wir die Bewegung der Teilchen verfolgen, können wir außerdem Anzeichen für die Bildung von Clustern finden.

