

MATERIALTRANSPORT BEI DER RIPPELBILDUNG IN GRANULAREN MEDIEN

MATERIAL TRANSPORT DURING RIPPLE GENERATION IN GRANULAR MEDIA

A. Wierschem¹, C. Groh², I. Rehberg², N. Aksel³, C.A. Kruelle⁴

¹ Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, D-91058 Erlangen

² Experimentalphysik V, Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth

³ Technische Mechanik und Strömungsmechanik, Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth

⁴ Maschinenbau und Mechatronik, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, D-76012 Karlsruhe

Granulare Medien, Partikel- und Sedimenttransport, Strömungsfeld
Granular systems, particle and sediment transport, flow field

Zusammenfassung

Es wird die Granulatbewegung und Rippelbildung in einer granularen Schicht untersucht, die in einem Ringkanal einer Scherströmung ausgesetzt ist. Die granularen Partikel werden einzeln detektiert, um das Einsetzen der Granulatbewegung und den Materialaustausch zwischen Rippeln zu studieren. Zudem wird das Strömungsfeld in dem Fluid mit Hilfe eines Particle image velocimeters (PIV) charakterisiert. Dies ermöglicht eine Bestimmung dimensionsloser Kennzahlen für das Einsetzen der Granulatbewegung. Bei ausgebildeten Rippeln zeigt sich, dass es zwischen ihnen kaum zu Materialaustausch kommt, sie sich somit ähnlich Barchanen wie isolierte Einheiten verhalten.

Einleitung

Sanddünen und -rippel werden wegen ihrer Bedeutung für die Wüstenausbreitung aber auch z.B. für die Schifffahrt intensiv untersucht. Neben Feldstudien werden sie auch in kontrollierten Laborexperimenten studiert und oszillatorisch, siehe beispielsweise Hansen et al 2001 oder Stegner und Wesfreid 1999, oder unidirektional angetrieben. Letzteres entweder durch eine rotierende Scheibe auf einem Ringkanal, wie bei Betat et al 1999 und 2002 oder Hori et al 2007, durch eine Druckdifferenz, wie bei Baas 1994 und Andreotti et al 2006, oder durch Schwerkraft getriebene Strömung entlang eines Abhangs, wie bei Southard und Dingler 1971 oder Loiseleux, et al 2005. Oft beschränken sich dabei die Untersuchungen vor allem auf die Form der Rippel oder Dünen. Der Einsatz der Granulatbewegung, seine Abhängigkeit von den Strömungsbedingungen und der Materialtransport bei wandernden, ausgebildeten Rippeln sind weit weniger gut verstanden.

Hier stellen wir Untersuchungen zur Granulatbewegung und zur Rippelbildung in einem Ringkanal vor. Gegenüber Gerinneströmungen oder Windkanälen hat er den Vorteil, dass die Masse im System erhalten bleibt und Ein- bzw. Ausflusseffekte vermieden werden. Andererseits treten radiale Abhängigkeiten auf, siehe Charru und Mouilleron-Arnould 2002 und Sørensen et al 2006, die die Rippel deformieren. Das System und die experimentellen Methoden werden nachfolgend vorgestellt. Daran anschließend berichten wir über das Einsetzen der Granulatbewegung und schließlich über die Bildung von Rippeln und ihrem Materialtransport. Die Ergebnisse werden abschließend zusammengefasst und diskutiert.

Experimentelles System und Methoden

Das experimentelle System zeigt Abbildung 1(a). Es besteht aus einem Ringkanal mit 292 mm Außendurchmesser, 250 mm Innendurchmesser und 58 mm Höhe, der mit einem rotierenden Deckel versehen ist. Der Deckel reicht 4 mm in den Kanal hinein. Sowohl Zylinder als auch die rotierende Scheibe sind aus Plexiglas gefertigt. Der Ringkanal wird teilweise mit geschwärzten Glaskugeln gefüllt. Die Kugeln haben eine Dichte von $2,45 \text{ g/cm}^3$. Ihr Durchmesser liegt nach wiederholtem Sieben in einem Intervall zwischen $400 \mu\text{m}$ und $425 \mu\text{m}$. Die Oberfläche der Kugelschicht wird mit einer T-förmigen Platte geebnet. Die Höhe der Flüssigkeitsschicht zwischen dem Deckel und dieser Granulatschicht liegt bei $17,8 \pm 0,4 \text{ mm}$.

Der Ringkanal befindet sich in einem hexagonal geformten Aquarium. Das Aquarium samt Ringkanal wird mit Silikonöl so befüllt, dass auch der Deckel des Ringkanals komplett bedeckt ist. Dichte und kinematische Viskosität des Silikonöls wurden in einem Temperaturintervall zwischen 292,15 K und 308,15 K bestimmt. Bei 303,15 K beträgt die Dichte $0,918 \text{ g/cm}^3$ und die kinematische Viskosität $9,4 \text{ mm}^2/\text{s}$. Während der Versuche variierte die Temperatur weniger als $\pm 0,5 \text{ K}$, sodass die Flüssigkeitsparameter um weniger als 1 % variierten.

Die Scherströmung wird durch den rotierenden Deckel erzeugt und mit Hilfe eines Particle image velocimeters (PIV) von Dantec Dynamics charakterisiert. Das PIV-System besteht aus einem Lasersystem aus zwei Frequenz verdoppelten ND:YAG-Lasern mit je 30 mJ Pulsenergie, Lichtschnittoptik und einer HiSense-Kamera mit einem 2,8/105 mm-Objektiv, einer PIV 1500 Messdatensammler und FlowManager Software. Der Lichtschnitt wird durch ein Plexiglasfenster von oben in den Ringkanal geführt, um Brechung an der deformierbaren Oberfläche des Silikonöls außerhalb des Kanals zu vermeiden. Für Messungen in Tangentialrichtung wurde ein 1 mm breiter Lichtschnitt verwendet, bei Messungen in radialer Richtung betrug die Lichtschnittbreite 4-5 mm.

Der Innenzylinder und die Glaskugeln geschwärzt, um Reflektionen des Lichtschnitts zu minimieren und das Strömungsfeld in der Flüssigkeit in der Nähe der granularen Schicht ausmessen zu können. Zu diesem Zweck wurden zudem fluoreszierende Tracerpartikel aus Polystyrol von Duke Scientific verwendet. Ihr Streulicht passiert einen Rotfilter vor dem Objektiv, der Licht mit Wellenlängen über 550 nm durchlässt, während das Laserlicht unterdrückt wird. Die Tracer haben eine Dichte von $1,05 \text{ g/cm}^3$ und einen mittleren Durchmesser von $8 \mu\text{m}$. Dieser Durchmesser wurde als Kompromiss aus Detektierbarkeit und Folgevermögen in der Strömung gewählt. Um Agglomerationen zu minimieren, wurden die trockenen Partikel in kleinen Mengen Silikonöl dispergiert, bevor sie in den Kanal eingebracht wurden.

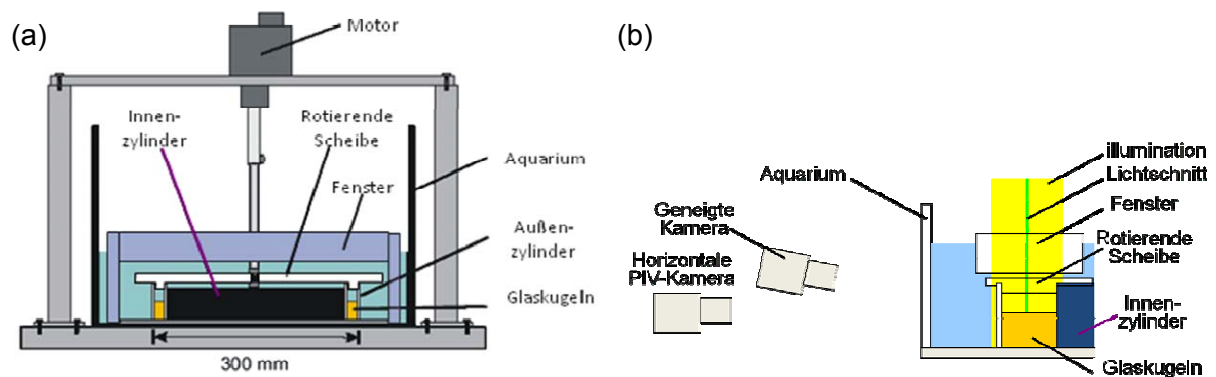


Abb. 1: Skizze des experimentellen Systems (a) und experimentelle Aufbauten (b)

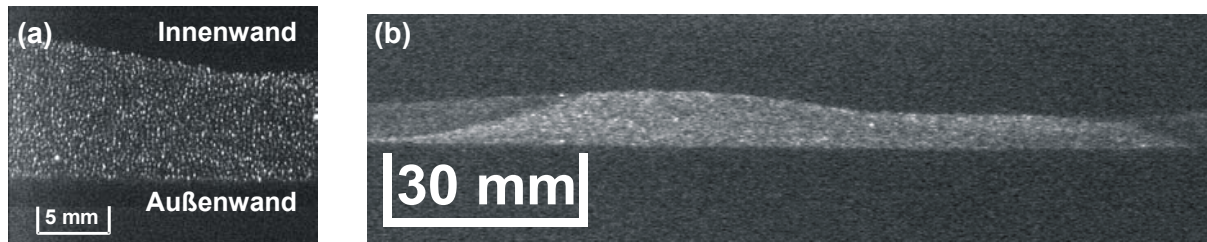


Abb. 2: Bild der Granulatoberfläche mit der geneigten Kamera (a) und mit der horizontalen Kamera (b)

Neben dem Strömungsfeld werden auch Positionsänderungen der Glaskugeln und die Form der Granulatschicht detektiert. Dazu wird ein Teil des Ringkanals von oben durch das Fenster mit einer 200 W Weißlichtquelle beleuchtet. Positionsänderungen im Granulat werden mit einer Kamera von der Seite detektiert, die $14^\circ - 15^\circ$ gegenüber der Horizontalen geneigt ist, wie in Abbildung 1(b) gezeigt. Eine weitere, horizontal positionierte Kamera zeichnet die Form des granularen Bodens auf.

Bei diesen Untersuchungen wird ausgenutzt, dass ein Teil des eingestrahlichten Lichts von einem kleinen Teil der Oberfläche der schwarzen Glaskugeln in die Kameras reflektiert wird. In der geneigten Kamera erscheinen so die einzelnen Kugeln mit einer Größe von etwa 9 Pixeln Durchmesser als dunkle Flächen mit kleinen, hellen Flecken. Abbildung 2(a) zeigt ein Beispiel. Durch einen auf die Größe der Kugeln angepassten Filter können die einzelnen Kugeln detektiert werden. Aus dem Vergleich zweier Bilder wird die Anzahl der Positionsänderungen des Granulats bestimmt.

Das Sichtfeld der horizontalen Kamera deckt einen größeren Bereich ab. Entsprechend ist eine Unterscheidung einzelner Kugeln nicht mehr möglich. Aufgrund der punktuellen Reflexionen erscheint nun die Oberfläche als raues Band zwischen dem schwarzen Innenzylinder und den tieferliegenden unbeleuchteten Kugeln am Außenzylinder des Ringkanals, wie in Abbildung 2(b) gezeigt. Mit einem Kantenfilter kann aus diesen Bildern die Rippelamplitude an der Außenwand und in der Nähe der Innenwand des Ringkanals bestimmt werden.

Einsetzen der Granulatbewegung

Die Scherströmung im Kanal lässt sich durch die Reynolds-Zahl $Re = Uh/\nu$ beschreiben. Hierbei bezeichnet U die Geschwindigkeit der rotierenden Scheibe in der Mitte des Ringkanals, h die Höhe der Flüssigkeitsschicht über dem ebenen Granulatboden und ν ist die kinematische Viskosität der Flüssigkeit. Mit steigender Reynolds-Zahl nimmt auch die Scherbeanspruchung an dem granularen Material zu, sodass es bei genügend hoher Reynolds-Zahl zur Bewegung des Granulats kommen kann. Der Einfluss des gescherten Fluids auf das Granulat wird üblicherweise durch zwei dimensionslose Parameter beschrieben, siehe z.B. Engelund und Fredse 1982 oder Coleman und Melville 1996. Dies ist zum einen die Partikel-Reynolds-Zahl $Re_p = u_\tau d/\nu$, wobei d der Durchmesser der Glaskugeln und u_τ die Schergeschwindigkeit am Granulatbett ist. Für letztere gilt: $u_\tau = \sqrt{\nu u_y|_{Bottom}}$, wobei $u_y|_{Bottom}$ der Gradient der mittleren Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zum Boden darstellt. Zum anderen ist es der Shields-Parameter $\theta = u_\tau^2 / (g(s-1)d)$, siehe Shields 1936. Hier ist g die Erdbeschleunigung und $s = \rho_s/\rho_f$ die spezifische Dichte mit der Dichte der Glaskugeln ρ_s und derjenigen der Flüssigkeit ρ_f . Neben diesen beiden Kennzahlen finden auch weitere Größen wie z.B. die Galileo-Zahl bei der Beschreibung des Einsetzens der Granulatbewegung Verwendung, wie bei Charru und Hinch 2006.

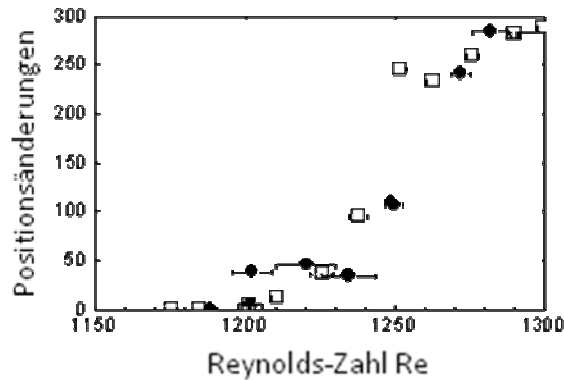


Abb. 3: Mittlere Anzahl von Positionsveränderungen der Glaskugeln zwischen zwei Bildern als Funktion der Reynolds-Zahl. Offene Symbole entsprechen einem Versuchslauf mit schrittweise abnehmender Reynolds-Zahl, Vollkreise einem darauf folgenden Versuchslauf mit schrittweise steigender Reynolds-Zahl. Zeitintervall zwischen zwei Bildern: 60 s.

Wie Abbildung 3 zeigt, werden bei Reynolds-Zahlen unterhalb von etwa 1190 keine Veränderungen des granularen Bettes beobachtet. Bei höheren Reynolds-Zahlen treten einzelne Ereignisse auf. Ihre Anzahl nimmt mit weiter steigender Reynolds-Zahl deutlich zu. In dem untersuchten Bereich wurden ausschließlich bodennahe Granulatbewegungen beobachtet.

Bildsequenzen, die mit der geeigneten Kamera bei einer Wiederholfrequenz von 25 Hz aufgenommen wurden, zeigen dass die Kugeln schräg durch den Kanal zur Innenwand wandern. Dies führt zu einer Akkumulation der Glaskugeln an der Innenseite des Ringkanals. Auch wenn die Reynolds-Zahl wieder erniedrigt wird, bleibt das granulare Bett uneben. Messungen des Strömungsfeldes zeigen, dass in der Flüssigkeit ein radialer Wirbel existiert, der für die radiale Wanderung der Glaskugeln verantwortlich ist, siehe Wierschem et al 2008.

Auch einmal generierte Rippel werden nicht vollständig bei Erniedrigung der Reynolds-Zahl wieder abgebaut. Ondulationen von einigen Kugeldurchmessern bleiben. Somit zeigt sich, dass das Einsetzen von Granulatbewegung und die Generierung der Rippel von der Vorgeschichte abhängen. Um reversible Bedingungen zu erhalten, wurde mit Vorscherung gearbeitet. So wurden zuerst Rippel hoher Amplitude bei einer Reynolds-Zahl von 1350 erzeugt. Danach wurde über ca. 4 Tage die Reynolds-Zahl in Schritten von etwa 26 bis auf 850 abgesenkt und später wieder schrittweise auf 1350 erhöht. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 3 gezeigt.

Die Partikel-Reynolds-Zahl und der Shields-Parameter bei Einsetzen der Granulatbewegung wurden knapp unterhalb des Einsetzens der Granulatbewegung bei einer Reynolds-Zahl von 1180 bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die Geschwindigkeiten senkrecht zur granularen Unterlage in tangentialer und in radialer Ebene des Ringkanals mit dem PIV gemessen. Der Geschwindigkeitsgradient, der in die Partikel-Reynolds-Zahl und den Shields-Parameter eingeht, wurde aus linearen Fits an das Geschwindigkeitsprofil erhalten, wie sie in Abbildung 4 wiedergegeben sind. Aus den linearen Fits ergeben sich eine Partikel-Reynolds-Zahl von 1,1 und ein Shields-Parameter von 0,1.

Bei Einsetzen der Rippelbildung ist die Granulatbewegung im zentralen und im innenwandnahen Bereich des Ringkanals am stärksten ausgeprägt. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel der radialen Häufigkeitsverteilung von Positionsänderungen der Glaskugeln.

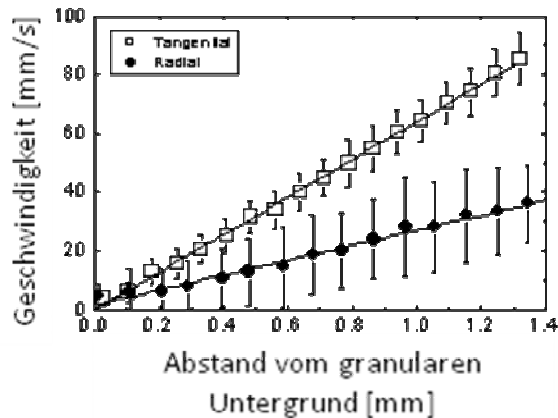


Abb. 4: Tangentiale und radiale Geschwindigkeitskomponenten in Nähe des granularen Betts in Kanalmitte kurz vor Einsetzen der Granulatbewegung. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Reynolds-Zahl: 1180.

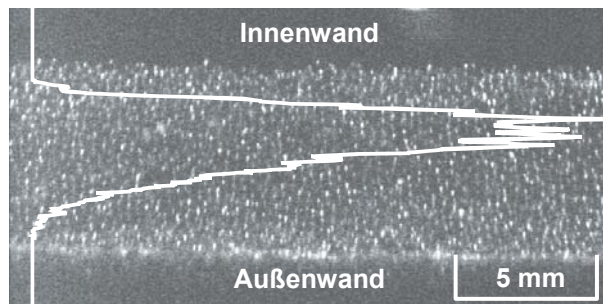


Abb. 5: Radiale Häufigkeitsverteilung der Positionsveränderungen des Granulats. Die Verteilung ist mit einem Einzelbild des granularen Bettes unterlegt. Reynolds-Zahl: 1210; Anzahl der Bilder: 413; Zeitintervall zwischen benachbarten Bildern: 60 s.

Rippel

Die Bildung von Rippeln koinzidiert in etwa mit dem Einsetzen der Granulatbewegung. Die Form der aus der Granulatbewegung resultierenden Rippel an der Außenwand und in Nähe der Innenwand des Ringkanals wurde mit der horizontalen Kamera untersucht. Aus Zeitreihen während des Vorbeiwanderns von Rippeln an einer festen Position im Kanal können damit auch ohne Verzerrungen die Amplituden der Rippel bestimmt werden. Abbildung 6 zeigt solche Zeitreihen im Kanal. Bei einer Reynolds-Zahl von 1260 bleibt der Bereich an der Außenwand des Kanals noch eben, während in der Nähe der Innenwand ein Rippel vorbeiwandert. Hier erscheinen nach einem ebenen Bereich zuerst die Leeseite des Rippels und danach die Luvseite. Bei einer Reynolds-Zahl von 1300 ist auch an der Außenwand das granulare Bett rippelförmig.

Sind Rippel generiert, wirken sie auf die Strömung im Fluid zurück, was wiederum die Granulatbewegung beeinflusst. Im leicht überkritischen Bereich der Rippelbildung wird noch ein kontinuierlicher Strom an Granulat entlang der Rippel beobachtet. Bei höheren Reynolds-Zahlen findet jedoch eine drastische Verarmung an Positionsänderungen in den Mulden zwischen den Rippeln statt. Abbildung 7 zeigt aus diesem Regime ein Beispiel. Zum einen ist in der oberen Zeile die Oberflächenform bei unterschiedlichen Zeiten abgebildet, wie sie mit der geneigten Kamera aufgenommen wurde, zum anderen ist in der unteren Zeile die Häufigkeit der Positionsänderungen als Grauwertbild dargestellt.

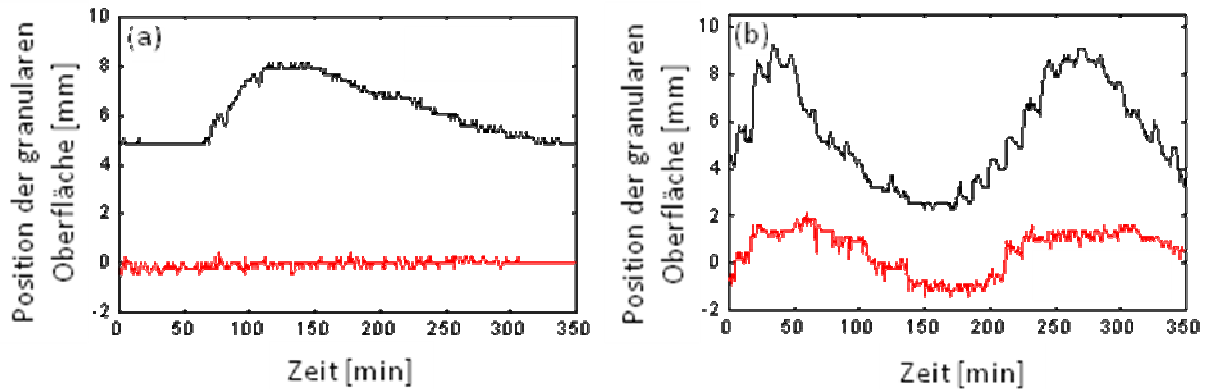


Abb. 6: Zeitreihe der Höhe des granularen Betts während des Passierens von Rippeln bei $Re = 1260$ (a) und $Re = 1300$ (b). Die unteren Kurven zeigen die Granulatoberfläche an der Außenwand an, die oberen in der Nähe der Innenwand.

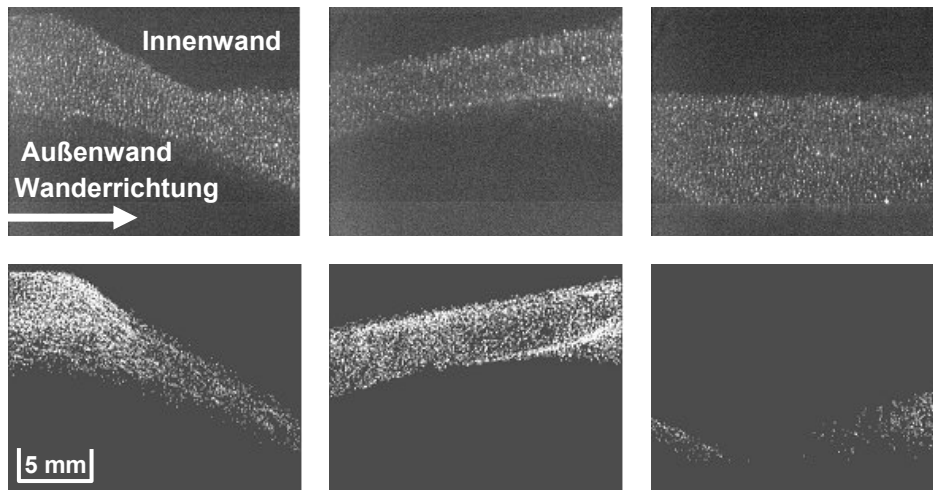


Abb. 7: Granulare Oberfläche während der Passage eines Rippels (oben) und Häufigkeitsverteilung von Positionsänderungen entlang des Rippels (unten). Letztere wurde aus einer 4 s dauernden Bildsequenz mit 12,5 Hz Wiederholrate erhalten. Die Bilder wurden an der gleichen Position zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen. Reynolds-Zahl: 1600.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Oberhalb einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit des Deckels bzw. einer Reynolds-Zahl wird Granulat an der Oberfläche einer granularen Schicht durch die Scherströmung angetrieben und Rippel werden generiert. Durch Reflektion von Weißlicht an den kugelförmigen Granulatteilchen, wie in Abbildung 2 gezeigt, wurden die einzelnen Teilchen identifiziert und ihre Positionsänderungen quantifiziert. Somit konnte sowohl das Einsetzen der Granulatbewegung bestimmt werden als auch positionsabhängige Granulatbewegung entlang der rippel untersucht werden. Schließlich konnte durch Vergrößerung der Skala die Rippelform erfasst werden. Das Strömungsfeld in der Nähe der granularen Schicht konnte durch Schwärzen des Granulats und Verwendung fluoreszierender Tracer samt optischem Filter bei PIV-Messungen untersucht werden.

Obwohl das Einsetzen der Granulatbewegung von der Vorgeschichte abhängt, ist es durch Vorscherung möglich, reversible Bedingungen einzustellen, wie in Abbildung 3 gezeigt. Für die Partikel-Reynolds-Zahl bei Einsetzen der Granulatbewegung ergibt sich mit Hilfe von PIV-Messungen der Wert 1,1 und für den entsprechenden Shields-Parameter 0,1. Diese

Werte passen sich gut in das Shields-Diagramm ein und befinden sich dort nahe an der Extrapolation, wie sie von Shields vorgeschlagen wurde, siehe White 1970. Das Granulat bewegt sich in unmittelbarer Nähe zur granularen Unterlage. Ein Hüpfen oder Verwirbeln von Granulat wurde bei unseren Untersuchungen nicht beobachtet.

In dem untersuchten Ringkanal bilden sich nahezu bei Einsetzen der Granulatsbewegung Rippel aus. Diese Rippel wirken auf die Fluidströmung zurück. Strömungsmessungen zeigen, dass auf der Leeseite der Rippel Ablösegebiete entstehen und dadurch die Scherbelastung in den Mulden wesentlich geringer ist als an der Luvseite des Rippels, siehe Wierschem et al 2008. Dieses wiederum scheint für die Verarmung der beobachteten Positionsänderungen des Granulats in den Mulden verantwortlich zu sein, wie sie in Abbildung 7 gezeigt wurde. Diese Rippel bewegen sich also im Wesentlichen aufgrund eines Wanderns von Granulat entlang der Oberfläche von Luv- zu Leeseite, ohne dass sie über einen Materialaustausch stark miteinander wechselwirken. Somit bleibt also für die Kopplung dieser ausgeprägten Rippel untereinander nur noch das Strömungsfeld im Fluid. Die Beobachtungen legen nahe, dass sich diese Rippel ähnlich den Sicheldünen nahezu wie isolierte Einheiten verhalten.

Dankesworte

Wir bedanken uns bei A. Karolewski und T. Edtbauer für Unterstützung bei der Durchführung der Experimente, sowie bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Projekte Ak 13/12-1 und Kr 1877/3-1 im Rahmen der Forschergruppe 608 „Nichtlineare Dynamik komplexer Kontinua“.

Literatur

- Andreotti, B., Claudin, P., Pouliquen, O., 2006: "Aeolian Sand Ripples: Experimental Study of Fully Developed States", *Phys. Rev. Lett.* 96, 028001
- Baas, J.H., 1994: "A flume study on the development and equilibrium morphology of small-scale bedforms in very fine sand", *Sedimentology*, 41, 185-209
- Betat, A., Frette, V., Rehberg, I., 1999: "Sand Ripples Induced by Water Shear Flow in an Annular Channel", *Phys. Rev. Lett.* 83, 88-91
- Betat, A., Kruehle C.A., Frette, V., Rehberg, I., 1999: "Long-time behavior of sand ripples induced by water shear flow", *Eur. Phys. J. E* 8, 465-476 (2002).
- Charru, F., Hinch, E.J., 2006: "Ripple formation on a particle bed sheared by a viscous liquid. Part 1. Steady flow", *J. Fluid Mech.* 550, 111-121
- Charru, F., Mouilleron-Arnould, H., 2002: "Instability of a bed of particles sheared by a viscous flow", *J. Fluid Mech.* 452, 303-323
- Coleman, S. E., Melville, B. W., 1996: "Initiation of bed forms on a flat sand bed", *J. Hydraul. Eng.* 122, 301-310
- Engelund, F., Fredse, J., 1982: "Sediment Ripples and Dunes", *Annu. Rev. Fluid Mech.* 14, 13-37
- Hansen, J.L., van Hecke, M., Hanning, A., Ellegaard, C., Andersen, K.H., Bohr, T., Sams, T., 2001: "Pattern formation: Instabilities in sand ripples", *Nature* 410, 324
- Hori, N., Yamada, A., Oshiro, Y., Sano, O., 2007: "Formation of Barchans and Ripples due to Steady Viscous Flow in an Annular Channel", *J. Phys. Soc. Jpn.* 76, 024401
- Loiseleux, T., Gondret, P., Rabaud, M., Doppler, D., 2005: "Onset of erosion and avalanche for an inclined granular bed sheared by a continuous laminar flow", *Phys. Fluids* 17, 103304 (2005).
- Shields, A., 1936: „Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau“, Doktorarbeit, Berlin
- Sørensen, J. N., Naumov, I., Mikkelsen, R., 2006, "Experimental Investigation of Three-dimensional Flow Instabilities in a Rotating Lid-driven Cavity". *Exp. Fluids* 41, 425-440
- Southard, J.B., Dingler, J.R., 1971: "Flume study of ripple propagation behind mounds on flat sand beds", *Sedimentology* 16, 251-263
- Stegner, A., Wesfreid, J.E., 1999: "Dynamical evolution of sand ripples under water", *Phys. Rev. E* 60, R3487-R3490 (1999).
- White, S. J., 1970: "Plane Bed Thresholds of Fine Grained Sediments", *Nature* 228, 152-153
- Wierschem, A., Groh, C., Rehberg, I., Aksel N., Kruehle C. A., 2008: "Ripple formation in weakly turbulent flow", *Eur. Phys. J. E* 25, 213-221