

Experimentieren mit Granularen Medien

Sigrid M. Weber

Didaktik der Physik, Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth

Zusammenfassung

Granulare Medien bieten faszinierende Möglichkeiten, ausgewählte Fragestellungen und Konzepte der nichtlinearen Dynamik experimentell zu erarbeiten. Es werden u.a. Materialkombinationen aus Küche und Spielplatz vorgestellt, die erfolversprechend einzusetzen sind, um ein gewisses Verständnis für fundamentale Begriffe wie Kausalität und Instabilität anschaulich zu vermitteln. Die präsentierten Serien von einfachen Experimenten zu Strukturbildungsphänomenen in diesen Materialien wecken sowohl in der Aus- als auch in der Fortbildung, bei Lehramtsstudenten, bei Lehrern wie Schülern, (verschüttete) Entdeckerfreude und ermöglichen insbesondere Physiklehrkräften, Schüler unter Ausnutzung des spielerischen Elements in fachspezifische Arbeitsweisen einzuführen (URL <http://didaktik.phy.uni-bayreuth.de/>).

1 Komplexe Systeme in der Physikausbildung: Vom linearen zum synergetischen Denken

Dieser Beitrag bringt den Leser mit der faszinierenden Welt der Schüttgüter in Berührung, die einerseits ein aktuelles Forschungsgebiet der Fachwissenschaft Physik darstellt und die andererseits jedem vertraut zu sein scheint, sowohl aus den Kindertagen – Sandburgen ... am Strand oder auf dem Spielplatz – als auch aus dem Alltag – Salz, Zucker oder Reis ... aus Küche und Supermarkt. Neben der Vermittlung einiger Charakteristika solcher GRANULARER MEDIEN ist ein Hauptziel unserer Arbeit fundamentale Begriffe und Konzepte aus einem Teilgebiet der modernen Physik, dem Gebiet der KOMPLEXEN SYSTEME¹, anhand geeignet ausgewählter Experimente bzw. Versuchsfolgen auf phänomenologischer Ebene unter Einbeziehung des spielerischen Elements zu lehren. Aufgrund mehrerer Vorteile der vorgestellten Experimentiermedien wie Alltagsbezug, Verfügbarkeit, Preiswertigkeit, Anschaulichkeit, Gefahrlosigkeit bzw. Umweltfreundlichkeit sind sie hervorragend geeignet sowohl an allgemeinbildenden Schulen als auch an Hochschulen zum Einsatz zu kommen.

Für den an der Hochschule wirkenden Physikdidaktiker lassen sich entsprechend seinen Tätigkeitsfeldern drei prinzipielle Wege realisieren, Inhalte aus dem Gebiet der KOMPLEXEN SYSTEME in die Physikausbildung einzubringen: Bei der Ausbildung von Lehramtskandidaten, bei der Fort- und u.U. auch Weiterbildung von Physiklehrkräften sowie bei der Kooperation mit Schulen z.B. bei der Durchführung von Lernforschungsprojekten. Die Unterschiede in Vorbildung und Interessen der involvierten Gruppen implizieren notwendigerweise eine differenzierte Schwerpunktsetzung. Allen gemeinsam ist jedoch das Bekanntmachen mit den Phänomenen bzw. deren, wo

¹Ein disziplinübergreifendes, aktuelles und stetig an Bedeutung gewinnendes Forschungsgebiet. Die präsentierte Thematik ist dem Gebiet der Strukturbildung in dissipativen Systemen zuzuordnen, einem Aspekt der Theorie KOMPLEXER SYSTEME. Noch vor wenigen Jahren ist diese Thematik mit dem rein physikalischen Etikett **Nichtlineare Dynamik** oder noch etwas früher auch **Synergetik** belegt worden.

erreichbar, systematisches Studieren sowie der notwendige Transfer der exemplarisch gewonnenen Einsichten.

Arten didaktischer Realisierung	Schwerpunkte
Integration in die fachdidaktische Ausbildung von Lehramtskandidaten	– zugrundeliegende Bildungsziele – notwendige Elementarisierungen – Experimentiertechniken
Fortbildungsmaßnahmen	– Vorstellung von Unterrichtseinheiten – fachwissenschaftliche Grundlagen
Lernforschungsprojekte	– Erprobung von Unterrichtseinheiten – Evaluation von Unterrichtseinheiten

Bevor einige Ziele dieses Transfers, die involvierten allgemeinen Kategorien physikalischer Begriffsbildungen wie **synergetisches Denken**, in Abschnitt 5 erörtert werden, sollen in Abschnitt 2 die methodische Grundkonzeption der Unterrichtseinheiten (für allgemeinbildende Schulen) vorgestellt werden – die Begegnung mit Phänomenen als Unterrichtsprinzip – und in Abschnitt 3 an die bildungstheoretische Grundkonzeption erinnert werden – das exemplarische Lehren und Lernen.

2 Methodische Grundkonzeption: Begegnung mit Phänomenen als Unterrichtsprinzip

Ein Teil unseres methodischen Konzepts basiert auf der phänomenologischen Einführung in physikalische Inhalte als Unterrichtsprinzip. Argumente für diese Wahl sind

1. Nutzung der Primärmotivation der Lerninhalte (Stichwort: Spielerisches Moment),
2. wichtige Einsichten sind bereits auf der Ebene der Phänomene vermittelbar (Stichworte: Instabilitätsbegriff, Synergieeffekt, Kausalitätsprinzipien, ...),
3. häufig anzutreffende Überfrachtung des Unterrichts mit kognitiven Lernzielen (Stichworte: Verfrühte Mathematisierung und Modellbildung),
4. die BEGEGNUNG MIT DEM PHÄNOMEN ist ein Funktionsziel Wagenscheins.

Dieses Basismoment soll im Unterricht sowohl durch Betonung des experimentellen Zugangs als auch durch verstärkte Selbsttätigkeit der Schüler/innen realisiert werden. Insbesondere der zweite Aspekt darf nicht vernachlässigt werden: Nur was man selbst **erlebt**, wird nicht vergessen. Um mit Wagenschein zu sprechen: *Eine Entdeckung wird am wirksamsten durch ihren nicht-rezeptiven Nachvollzug verstanden und behalten; durch eine, sei es auch nur bescheidene "Wiederentdeckung".*² Das oft beklagte Faktum, daß viele Schüler/innen Abgeprüftes nur im Kurzzeitgedächtnis gespeichert haben, ist angesichts der hinter den Lerninhalten allgemeinbildender Schulen für den Nichtexperten verborgenen allgemeinen Bildungsziele bedauerlich. Fehlt damit doch eigentlichem Bildungsgut die Verankerung. Eine favorisierte Unterrichtsform ist im vorgestellten Kurs daher entdeckend. Pädagogisches Ziel ist unter Zugrundelegung der genannten hohen Primärmotivation der eingesetzten Medien eine Weckung von Interesse und Ausdauer bei der Durchführung von Versuchsreihen sowie das Erarbeiten systematischer Arbeitstechniken durch die Schüler/innen. Eine Teilindividualisierung des Unterrichts wird durch die weitgehend freie Wahl von

²Wagenschein, Martin, Verstehen lehren, Weinheim und Basel, 1989^s, S. 126.

zu untersuchenden Granulatmischungen möglich. Die Lerntätigkeiten der Schüler umfassen insgesamt:

- (i) Allgemein fachspezifische Arbeitsweisen Anwenden,
- (ii) Informationen Gewinnen,
- (iii) Informationen Sortieren/Katalogisieren,
- (iv) Informationen Ver-/Bearbeiten,
- (v) Kommunizieren,
- (vi) einige allgemeine Bildungsziele durch Transferleistungen *Erarbeiten* (siehe Ziele 1 bis 5 in Abschnitt 3).

3 Bildungstheoretische Grundkonzeption: Exemplarizität

Exemplarizität sehen wir aus dem Blickwinkel der Kategorialen Bildung (vgl. Lern-tätigkeit (vi) in Abschnitt 2). Das Besondere im Sinne Klafkis sind die angestrebten Serien von Experimenten, das zu erschließende Allgemeine sind Prinzipien der nichtlinearen Dynamik sowie die Einsicht in deren globale Bedeutung. Folgende Ziele können erreicht werden:

1. Bewußtsein, daß in realen Systemen die Bildung von Strukturen möglich ist.
2. Wissen, daß Strukturbildungsprozesse selbstorganisiert sein können.
3. Einsicht, daß Strukturbildung als Folge einer Instabilität spontan erfolgt.
4. Bewußtsein, daß durch menschlichen Eingriff in natürliche Systeme Instabilitäten hervorgerufen werden können.
5. Einblick in den Kausalitätsbegriff in nichtlinearen Systemen (synergetisches Zusammenwirken von Subsystemen).

Die Erbringung dieser Transferleistung betrachten wir als ein wesentliches Ziel eines exemplarischen Kurses zum Thema **Strukturbildung in Schüttungen**. Den physikalischen Hintergrund der zugehörigen exemplarischen Lerninhalte bzw. -ziele diskutieren wir in Abschnitt 5.

4 Granulate und deren Exemplarizitätscharakter

Zur Orientierung soll ein kurzer Überblick über GRANULARE MEDIEN oder auch Schüttgüter und deren Eigenschaften gegeben werden, zumal die technische Bedeutung enorm ist. Allein ca. 60% der Produkte der chemischen Industrie sind Granulate und weitere ca. 20% der Produkte enthalten pulvrige Bestandteile.³ Probleme wie Verbackung, Verdichtung, Dilatanz, Speziestrennung, problematisches Fließverhalten usw. tauchen bei jeder Granulatverarbeitung auf. Sie sind Folge des Teilchencharakters von Granulaten. Die einzelnen Körner variieren in Größe, Form, Härte und Dichte. In der Regel herrscht lokale und/oder globale Unordnung. Bewegung des Granulats impliziert typabhängig aufgrund von Kontaktkräften (Kollisionen und/oder Reibung) lokale Rotationen. Das System ist i.a. nichtlinear und dissipativ wegen Reibungseffekten, die diverse stabile statische Konfigurationen verursachen

³Ennis, B.J., Unto dust shalt thou return, in: Behringer R.P. and Jenkins, J.T. (eds.), *Powders and Grains 97*, Rotterdam, 1997, p.13.

(Stichworte: Brückenbildung, Drucklokalisierung). Aufgrund von Dissipation treten Instabilitäten und charakteristische Längenskalen bei den verschiedenen Prozessen auf. Der diskrete Charakter des Mediums führt zu Phasenübergängen. Es kann sowohl fluid- als auch festkörperartiges Verhalten vorliegen, bei schwachen Scherkräften herrscht Plastizität, bei starken Fließen vor. Bei einem trockenen Granulat erfolgt der Zusammenhalt nur aufgrund der Gravitation, nicht durch Kohäsionskräfte. Um ein Schüttgut in Bewegung zu versetzen, ist Energiezufuhr notwendig, entweder durch Vibration oder durch Umwandlung von potentieller in kinetische Energie (Fallen bzw. Rollen im Gravitationsfeld). Letztere Bewegung eines Granulats kann als Massenfluß, beispielsweise in Röhren, Sanduhren, Einfüllstutzen, ..., oder als Oberflächenfluß wie in Schüttungen auftreten. Übergangsbereiche existieren: In Mischtrommeln sind die Verhältnisse von Form und Länge, Rauigkeit der Trommelwände, Drehzahl, Winkelbeschleunigung und Art der Granulatmischung abhängig. Im in Abschnitt 5 präsentierten Kurs tritt die Lawineninstabilität oder Stick-Slip-Instabilität auf. Dieser Übergang vom Haften zum Gleiten findet statt, wenn eine Granulatoberfläche über einen bestimmten kritischen Winkel θ_m hinaus geneigt wird. Als Folge tritt Oberflächenfluß auf, der erst stoppt, wenn die Neigung auf einen kleineren Winkel θ_r , den Böschungswinkel, verringert wird. Typischerweise beträgt $\theta_m - \theta_r$ einige Grad.

5 Physikalische Lerninhalte des Kurses

Eine Unterrichtseinheit zum Thema Strukturbildung in Schüttungen (Ein exemplarischer Kurs zum Instabilitätsbegriff in dissipativen Systemen) ist eindeutig durch ihre Lernziele gekennzeichnet. Das Grobziel eines ersten einführenden Kurses lautet: *Kenntnis der Korngrößentrennung in Schüttungen von Granulaten durch Lawinenströmungen, Überblick über grundlegende Phänomene der Strukturbildung in granularen Systemen mit Oberflächenfluß aufgrund von Korngrößentrennungsprozessen.* Es kann durch folgende Teilziele erreicht werden.

- 1.1 Kenntnis des Begriffs Granulat sowie dessen Bedeutung in Alltag und Technik.⁴
- 1.2 Fähigkeit, spezielle Versuche zur Schüttung von granularen Medien durchzuführen, [Versuchsaufbau zur Schüttung in einer Hele-Shaw-Zelle].
- 1.3 Kenntnis des Begriffs Böschungswinkel bzw. Schüttwinkel sowie Fähigkeit, diesen experimentell zu ermitteln.
- 1.4 Einsicht, daß eine mögliche Klassifikation granularer Medien mittels des Böschungswinkels erfolgen kann.
- 1.5 Kenntnis des Begriffs Lawine sowie Wissen, daß eine granulare Lawinenströmung eine Oberflächenströmung darstellt.
- 1.6 Fähigkeit, eine Oberflächenströmung von einer Massenströmung zu unterscheiden.
- 1.7 Einblick in den Instabilitätsbegriff am Beispiel einer Schüttung.
- 1.8 Fähigkeit, ein Experiment zur Schüttung einer binären Mischung granularer Medien durchzuführen.
- 1.9 Kenntnis der Begriffe Roll- und Stoßwelle sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen.
- 1.10 Kenntnis des Begriffs (partielle) Entmischung sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen [Anwendung: Kinetisches Sieben].

⁴Aus Motivationsgründen kann es abhängig vom gewählten Lehrgang günstig sein, Teilziel 1.1 nicht an den Anfang zu stellen.

- 1.11 Kenntnis des Begriffs Struktur bzw. Muster am Beispiel von Schüttungen.
- 1.12 Bewußtsein, daß eine geeignete Schüttung einer binären Granulatmischung Strukturen erzeugen kann.
- 1.13 Kenntnis des Begriffs Streifenbildung (Stratifikation) sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen.
- 1.14 Fähigkeit, ein Experiment zur Schüttung einer ternären Mischung granularer Medien durchzuführen.
- 1.15 Einsicht, daß bei einer Schüttung das synergetische Zusammenwirken der Einzelkomponenten einer ternären Mischung, Strukturen erzeugen kann, die auf der Ebene der Untersysteme (binäre Komponenten) nicht existieren.
- 1.16 Einblick in den Kausalitätsbegriff in nichtlinearen Systemen.

Im Vortrag sind folgende Granulat(-mischungen) vorgestellt worden: Schwarzer Senf, Sago, Amaranth, Siedesalz, Garnierstreußel, Rohrzucker, diverse Glaskugeln, Sandstrahlmischkorn, Mohn, gefärbter Einmachzucker sowie Hochofenschlacke (Reihenfolge wie im Vortrag). Zusätzlich eignen sich verschiedene Sande hervorragend. Die Schüttungen werden mittels verschiedener Trichter (eventuell mit Hahn, worüber auch die Zuflußrate geregelt werden kann) in quasizweidimensionale Silos vorgenommen, die von zwei planparallelen Platten relativ geringen Abstands gebildet werden. Zur Verringerung elektrostatischer Aufladung des Schüttgutes sind Platten aus Glas mit Distanzhaltern empfehlenswert. Die Abhängigkeit des Böschungswinkels vom Granulattyp kann mittels diverser Sande und Samen vgl. Abb. 1 erarbeitet werden. Die scharfe Trennung zwischen Gebieten mit *eingefrorenen* Körnern und

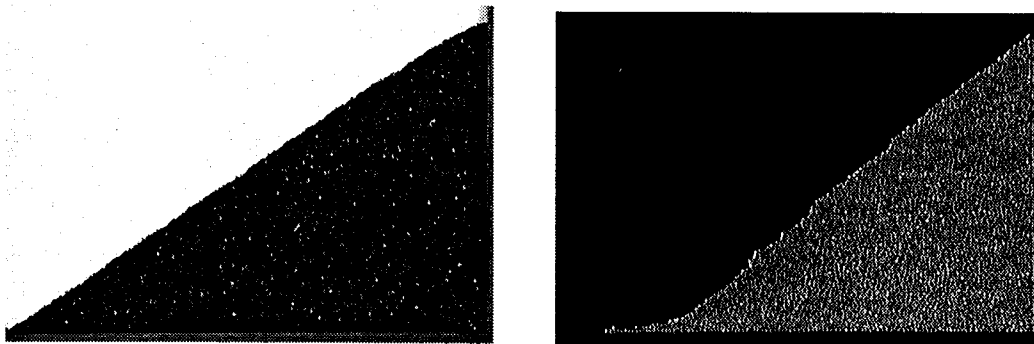


Abbildung 1:
Unterschiedliche Böschungswinkel von Senf (links) und Sago (rechts)

rutschenden Körnern während eines Lawinenabgangs kann an großen dunklen Samen gut sichtbar gemacht werden (Abb. 2). Das in Abb. 3 abgebildete Auftreten von Stoßwellen ist notwendig für das Phänomen der regelmäßigen Stratifikation. Das System Zucker-Glaskugeln als Subsystem einer ternären Mischung Garnierstreußel-Rohrzucker-Glaskugeln betrachtet zeigt einen anderen Strukturtyp als das in Abb. 4 dargestellte Subsystem Garnierstreußel-Rohrzucker, weswegen das Verhalten der ternären Mischung, Streifenfolgen der Periode drei, aus der Kenntnis des Verhaltens der Subsysteme von Schülern nicht vorhergesagt werden kann. Dies ist typisch für synergetisches Zusammenwirken von Subsystemen in nichtlinearen Systemen und liefert den erstrebten Einblick in deren Kausalitätseigenschaften. Hier ist nicht Raum weitere Details zu diskutieren. Weiterführende Unterrichtseinheiten sind möglich, wo u.a. auch die Abhängigkeit der Strukturen von der Zuflußrate behandelt wird.

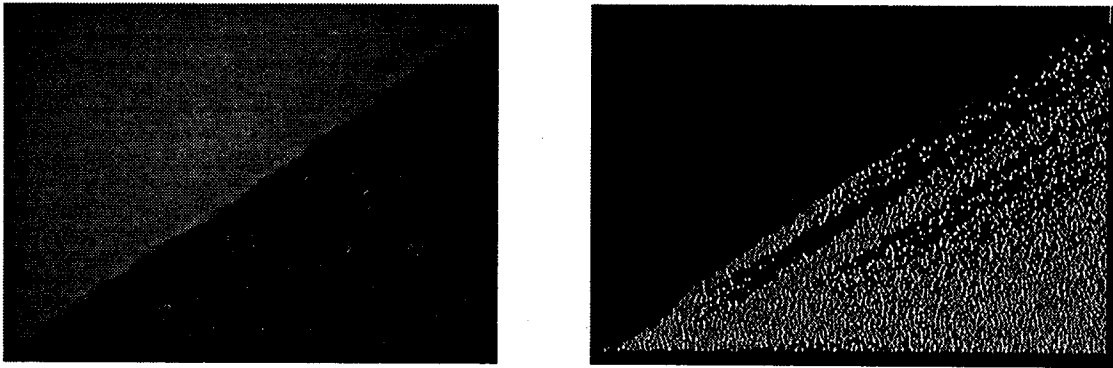


Abbildung 2:
Senflawine als Kennzeichen einer Oberflächenströmung (links) und teilweise Separation bei einer binären Mischung Sago-Senf (rechts)

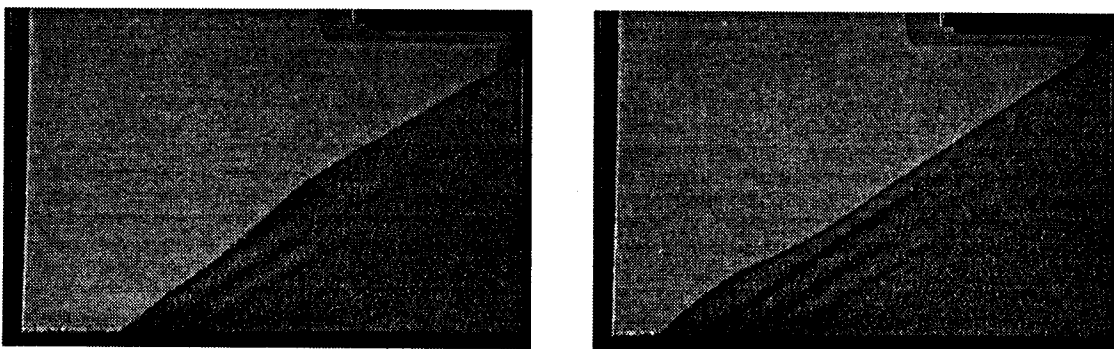


Abbildung 3:
Roll- (links) und Stoßwelle (rechts) während des Schüttens einer binären Mischung aus Rohrzucker und Glaskugeln, die Stratifikation entwickelt.

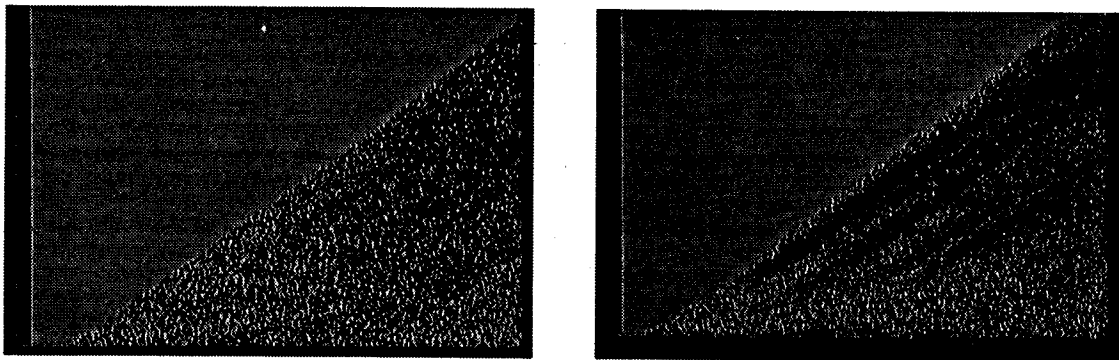


Abbildung 4:
Fehlende Entmischung im Subsystem Garnierstreufel-Rohrzucker (links) und Stratifikation in der ternären Mischung aus Garnierstreufeln, Glaskugeln und Rohrzucker (rechts).

12. Granulare Medien

12.0 Lernziele dieses Versuchsthemas

- 1.1 Kenntnis des Begriffs Granulat sowie dessen Bedeutung in Alltag und Technik.
- 1.2 Fähigkeit, spezielle Versuche zur Schüttung von granularen Medien durchzuführen,
[Versuchsaufbau zur Schüttung in einer Hele-Shaw-Zelle].
- 1.3 Kenntnis des Begriffs Böschungswinkel bzw. Schüttwinkel sowie Fähigkeit, diesen experimentell zu ermitteln.
- 1.4 Einsicht, daß eine mögliche Klassifikation granularer Medien mittels des Böschungswinkels erfolgen kann.
- 1.5 Kenntnis des Begriffs Lawine sowie Wissen, daß eine granulare Lawinenströmung eine Oberflächenströmung darstellt.
- 1.6 Fähigkeit, eine Oberflächenströmung von einer Massenströmung zu unterscheiden.
- 1.7 Einblick in den Instabilitätsbegriff am Beispiel einer Schüttung.
- 1.8 Fähigkeit, ein Experiment zur Schüttung einer binären Mischung granularer Medien durchzuführen.
- 1.9 Kenntnis der Begriffe Roll- und Stoßwelle sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen.
- 1.10 Kenntnis des Begriffs (partielle) Entmischung (Segregation) sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen
[Anwendung: Kinetisches Sieben].
- 1.11 Kenntnis des Begriffs Struktur bzw. Muster am Beispiel von Schüttungen.
- 1.12 Bewußtsein, daß eine geeignete Schüttung einer binären Granulatmischung zur Erzeugung von Strukturen führen kann.
- 1.13 Kenntnis des Begriffs Streifenbildung (Stratifikation) sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen.
- 1.14 Fähigkeit, ein Experiment zur Schüttung einer ternären Mischung granularer Medien durchzuführen.
- 1.15 Einsicht, daß bei einer Schüttung das synergetische Zusammenwirken der Einzelkomponenten einer ternären Mischung, Strukturen erzeugen kann, die auf der Ebene der Untersysteme (binäre Komponenten) nicht existieren (●●).
- 1.16 Einsicht in die Exemplarizität des Lerninhalts (●●) sowie Fähigkeit, das im Exemplarischen verborgene Allgemeine zu erschließen.
- 1.17 Überblick über technische Methoden zur Mischung granularer Medien.
- 1.18 Fähigkeit, spezielle Versuche zur Mischung von granularen Medien durchzuführen,
[Versuchsaufbau zur Mischung in rotierenden Trommeln].
- 1.19 Einblick in die Kornbewegung in rotierenden Trommeln sowie Fähigkeit diese zu beschreiben
- 1.20 Kenntnis des Begriffs rotationsinduzierte Segregation sowie Fähigkeit, diese experimentell zu erzeugen.
- 1.21 Einblick in Ursachen des Effekts der rotationsinduzierten Segregation.
- 1.22 Einblick in den Kausalitätsbegriff in nichtlinearen Systemen.

12.1 Fachwissenschaftliche Grundlagen

12.1.1 Aufgaben zur Vorbereitung

Folgende Fragen sind schriftlich zu beantworten (Literatur [1], [2]):

1. Geben Sie eine möglichst knappe und prägnante Definition folgender Begriffe:
 - Granulat bzw. granulares Medium, Schüttgut,
 - Böschungswinkel, Schüttwinkel [1],
 - Massenfluß, Oberflächenfluß,
 - Roll- bzw. Stoßwelle bei einer Oberflächenströmung (mit Skizze) [2],
 - Kinetisches Sieben.

Hinweis: Sieben ist ein Korngrößentrennungsprozeß!

2. Was versteht man unter dem Phänomen der Brückenbildung, welche Konsequenzen ergeben sich u.a. für die Stabilität von Silos bzw. geeignete Entnahmetechniken (z.B. in Betonwerken)?

Hinweis: Silobeben!

3. Wann und wo tritt die sog. Stick-Slip-Instabilität (Lawineninstabilität) auf? Was wird genau unter dem Schlagwort *self organized criticality* verstanden?
4. Warum ist der Massenfluß in einer Sanduhr, d.i. die Auslaufmenge pro Zeiteinheit, unabhängig von der Füllmenge? Formulieren und diskutieren Sie das analoge Problem für eine Wasseruhr!

12.2 Methodische und technische Grundlagen

12.2.1 Aufgaben zur Vorbereitung

Folgende Aufgaben sind schriftlich zu bearbeiten!

1. Entwickeln Sie einen Freihandversuch zur Lawineninstabilität! Skizze! Liste der Einzelteile (Mit Material-, Größen- bzw. Maßangaben)!
Hinweis: z.B. Rahmenloser Bilderhalter als Grundbaustein!
2. Nennen Sie technische Anwendungen und natürliche Vorkommen von Granulaten! Jeweils mindestens sechs Beispiele mit kurzer Beschreibung (in Stichworten genügt)!
3. Wie läßt sich technisch ein Mischen granularer Medien realisieren? Geben Sie verschiedene Methoden mit Einsatzbeispiel an!
4. Wie läßt sich technisch ein Separieren granularer Medien nach Korngößen realisieren? Geben Sie mindestens drei Methoden an!
5. Schätzen Sie ab, wieviele und welche (Produktgruppen genügen) granulare Medien Schülern der S1 (das sind Klassen 5 – 10) bekannt sind.

12.3 Versuche

12.3.1 Schüttungen in einem quasi-zweidimensionalen Silo

Für alle Schüttungen werden quasi-zweidimensionalen Silos, sog. Hele-Shaw-Zellen benutzt. Zum Ein- oder Umfüllen einen geeignet befestigten Trichter verwenden. Die Schüttversuche in einer Wanne ausführen. Die einzelnen Granulatproben bitte sortenrein erhalten. Keine Körner auf den Boden streuen! Es besteht Sturzgefahr!

Einkomponentige Granulate

Versuch 1: Bestimmung des Böschungswinkels einer Schüttung

Bestimmen Sie jeweils den Böschungswinkel der Elemente der Substanzgruppen A und B. Legen Sie dazu eine Overheadfolie an ein quasi-zweidimensionales Silo (Hele-Shaw-Zelle) an, und zeichnen Sie bei gleicher maximaler Füllhöhe oder identischer Basislänge der jeweiligen Schüttungen den Verlauf der Granulatoberfläche mit Folienstift auf! Erstellen Sie einen Graphen, der die Abhängigkeit des Böschungswinkels von der Granulatsorte belegt! Welche Tendenzen lassen sich entnehmen?

Hinweis: Reinigen Sie vor Einfüllen eines neuen Granulatyps das Silo mit einem Pinsel und/oder einer Bürste von etwaigen Resten!

Versuch 2: Demonstration des Oberflächenflusses

Benutzen Sie ein relativ grobkörniges Granulat ($\phi \geq 0,8\text{mm}$), um den Oberflächenfluß bei einer Lawenströmung zu studieren! Wieviele Lagen von Körnern sind in Bewegung? Welche Aussagen lassen sich über die (zeitliche) Form der Grenzfläche zwischen *eingefrorenen* und bewegten Körnern machen?

Hinweis: Zum Studium von Lawinen steht auch eine quasi-zweidimensionale Trommel ($\phi_{\text{innen}}=26\text{ cm}$) gefüllt mit einer ternären Mischung sowie mehrere dreidimensionale Trommeln ($\phi_{\text{innen}}=9,5\text{ cm}$) zur Verfügung. Die Füllung mit einer Mischung aus Glaskugeln zweier Farben (Durchmesserdispersion $0,40\text{mm} \leq d \leq 0,60\text{mm}$) eignet sich zum Studium von Partikeltrajektorien.

Zweikomponentige (binäre) Granulatmischungen

Versuch 3: Segregation, Roll- und Stoßwellen, Subsysteme der Mischung von Versuch 4

Realisieren Sie bei der Schüttung einer zweikomponentigen Mischung (Substanzgruppen C und D) die Fälle totale Entmischung, partielle Entmischung sowie Stratifikation! Bei totaler und partieller Entmischung ist der Verlauf der Grenzflächen zwischen den Komponenten auf Folie festzuhalten! Skizzieren Sie Roll- und Stoßwellen!

Dreikomponentige (ternäre) Granulatmischungen

Versuch 4: Synergetische Effekte bei Schüttungen

Untersuchen Sie eine ternäre Mischung bestehend aus bereits von Ihnen untersuchten binären Teilkomponenten auf eventuelle Entmischung! Ist das Verhalten der ternären Mischung aus der Kenntnis des Verhaltens aller binären Teilkomponenten (Subsysteme) vorhersagbar?

12.3.2 Granulatbewegung in rotierenden Mischtrommeln

Bestimmen Sie im Falle der Existenz Wellenlänge sowie Farbfolge der Strukturen!
Vorsicht: Den Motor des kleinen Walzenrollers maximal mit 6V= betreiben!

Einkomponentige Granulate

Versuch 5: Oberflächenfluß in rotierenden Trommeln

Studieren Sie das Verhalten einer einkomponentigen Mischung (eventuell ca. 0,1 % gefärbte Tracerteilchen verwenden) in einem Walzenmischer in Abhängigkeit von Füllgrad und Drehzahl!

Zweikomponentige (binäre) Granulatmischungen

Versuch 6: Segregation bei variierender Korngröße

Rotieren Sie die in Tabelle 1 angegebenen binären Mischungen mit Hilfe des kleinen Walzenmischers. Ergänzen Sie die Tabelle sorgfältig, Gefäßtyp angeben!

Versuch 7: Subsysteme der ternären Mischung von Versuch 8

Rotieren Sie die binären Mischungen

- (i) Glaskugeln-Sand,
- (ii) Mohn-Sand und
- (iii) Mohn-Glaskugeln

mit Hilfe des kleinen Walzenmischers. Notieren Sie die Daten der Proben sorgfältig, Gefäßtyp angeben!

Dreikomponentige (ternäre) Granulatmischungen

Versuch 8: Variation der Gefäßgröße und des Füllgrades

Untersuchen Sie das Verhalten des Probensatzes ternärer Mischungen (Glaskugeln-Sand-Mohn) bei verschiedenen Rotationsfrequenzen, Füllungsgraden der Trommel als Funktion der Konzentration der einzelnen Komponenten! 6 Proben sind fertig abgefüllt. Wann können Sie einen synergetischen Effekt der Subsysteme nachweisen?

12.4 Aufgaben zur Auswertung

Unterrichtsskizze zu einer Unterrichtseinheit in der die Lawineninstabilität Lerninhalt sein soll.

Literatur

- [1] Weber, S.M., Experimentieren mit Granularen Medien, DPG Frühjahrstagung 1998
- [2] Gray, J.M.N.T. und Hutter, K., Physik granularer Lawinen, Phys. Bl. 54 (1998) Nr. 1, S. 37