

Granulare Materie und dissipative Strukturbildung bzw. Selbstorganisation: Kontexte, Theorien und Inhalte der Themen – Ergebnisse eine Expertenbefragung

Joachim S. Haupt & Volkhard Nordmeier

Didaktik der Physik, Freie Universität Berlin, Arnimallee 14, 14195 Berlin
joachim.haupt@fu-berlin.de, volkhard.nordmeier@fu-berlin.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Überblick über die aktuellen Forschungsbereiche zu den Themenfeldern *Granulare Materie*, *Dissipative Strukturbildung* und *Selbstorganisation* gegeben. Dabei wird unterschieden in Forschungsbereiche, die Modelle und Theorien umfassen, sowie in konkrete Kontexte, die sich auf Anwendungen und Phänomene beziehen. Diese Ergebnisse basieren auf einer Expertenbefragung.

1. Einleitung und Motivation

Die inhaltliche Einordnung und thematische Verortung der Forschungsgebiete *Granulare Materie*, *Strukturbildung* und *Selbstorganisation* gestaltet sich schwierig, weil sie interdisziplinär angelegt sind und damit quer zur gewachsenen Kategorisierung der Wissenschaften liegen. Als Überbegriff, der diese Themenfelder umfasst, hat sich die Bezeichnung *nichtlineare Physik* durchgesetzt.

Das Forschungsfeld Granulare Materie ist durch die Untersuchung des Verhaltens von Stoffen charakterisiert, die aus einzelnen Partikeln bestehen, welche größer als $1\mu\text{m}$ sind. Sie unterliegen folglich keinen quantenphysikalischen Effekten. Typischerweise wird das dynamische Verhalten von sehr vielen Partikeln untersucht, meistens in einem dissipativen System unter Zufuhr von Energie in Form einer mechanischen Anregung [78].

Die Forschung zu den Bereichen Strukturbildung und Selbstorganisation beschäftigt sich mit dem Entstehen von räumlich und/oder zeitlich wahrnehmbaren ‚Mustern‘, beispielsweise in einem Fließgleichgewicht oder fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht [16]. Der Begriff Selbstorganisation verweist auf die der Strukturbildung zugrunde liegenden (Wirkungs-)Mechanismen.

In der Vergangenheit waren einzelne Aspekte der Themenbereiche Granulare Materie, Strukturbildung und Selbstorganisation bereits Gegenstand fachdidaktischer Forschung und Entwicklung [76][17][49]. Als Inhalt im Physikunterricht sind sie inzwischen in den Lehrplänen vieler Bundesländer im Wahlbereich in der Oberstufe optional verortet [66].

In den letzten Jahren haben diese Themen – zumindest in der fachdidaktischen Diskussion – jedoch an Aufmerksamkeit verloren, obwohl es gerade für die nichtlineare Physik Hinweise aus empirischen Untersuchungen gibt, die für eine Umsetzung in der

Schule sprechen. Beispielsweise wurden in einer Expertenbefragung von Komorek et al. [32] 34 ExpertInnen zum Bildungswert der nichtlinearen Physik befragt. Als ExpertInnen galten hier NaturwissenschaftlerInnen, FachdidaktikerInnen (aller Naturwissenschaften), ErziehungswissenschaftlerInnen und ExpertInnen der Schulpraxis. Es zeigten sich folgende Befunde: „*Eine Integration nichtlinearer Physik in die Lehrpläne für Gymnasien wird von allen Experten als erstrebenswert angesehen*“ (ebd., S. 44). Weitergehend unterstützen die ExpertInnen „*die didaktische Rekonstruktion der Physik der nichtlinearen Systeme*“ (ebd., S. 33).

Ein weiterer Befund lässt sich aus TIMSS/III entnehmen ([1], S. 130): „*Besonders große Leistungsfortschritte sind auf dem Gebiet der modernen Physik – ein spezifisches Stoffgebiet des 13. Jahrgangs – zu verzeichnen. Aber auch in den übrigen, weniger jahrgangsspezifischen Stoffgebieten werden Leistungszuwächse erreicht. Offenbar gelingt es mit der Einführung der modernen Physik, eine theoretische Perspektive zu eröffnen, die auch die übrigen Stoffgebiete der Physik besser integriert und ein vertieftes Verständnis erschließt [...].*“

Diese Aussage bezieht sich zwar auf Inhalte der Teilchen-, Quanten-, Astrophysik und Relativitätstheorie, lässt sich vermutlich aber auch auf die Lernförderlichkeit von anderen Themen der modernen Physik erweitern.

Trotz dieser Argumente wurden die Themenfelder Granulare Materie, Strukturbildung und Selbstorganisation (im Weiteren abgekürzt mit G und S) als Gebiete der modernen Physik im unterrichtlichen Kontext bislang nur wenig umgesetzt [66][68].

2. Forschungsvorhaben

Aufgrund dieser Befundlage soll in einem Forschungsvorhaben nach einem modifizierten Modell

der didaktischen Rekonstruktion [29], zunächst eine fachliche Klärung des aktuellen Forschungsstandes in den Themenbereiche G und S erfolgen und zusätzlich die LehrerInnenperspektive erfasst werden. Kattmann et al. betont für den Prozess der didaktischen Rekonstruktion im Rahmen der fachlichen Klärung auch den Rückbezug auf das Fach selbst: „Die Didaktische Rekonstruktion umfasst sowohl das Herstellen pädagogischer bedeutsamer Zusammenhänge, das Wiederherstellen von im Wissenschafts- und Lehrbetrieb verlorengegangenen Sinnbezügen, wie auch den Rückbezug auf Primärerfahrungen sowie auf originäre Aussagen der Bezugswissenschaften“ ([29], S. 4).

Um diesen Rückbezug auf „originäre Aussagen der Bezugswissenschaften“ (ebd.) zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieses Vorhabens zunächst eine Expertenbefragung von FachwissenschaftlerInnen durchgeführt, die auf den Gebieten G und S forschen. Ziel der Befragung war, sowohl den aktuellen Stand der Forschung, zentrale Fragestellungen, Methoden und möglichen Anwendungen zu erheben, als auch den fachlichen Gegenstandsbereich G und S als Teilgebiet der nichtlinearen Physik weiter auszuscharfen.

3. Befragung

3.1. Befragungsmethodik - Leitfragen

Um den Forschungsstand zu explorieren, wurde die Methode des leitfadengestützten Experteninterviews gewählt [6][18]. Die Befragungen wurde mit Hilfe von Telefoninterviews oder direkten Interviews durchgeführt (je nach Verfügbarkeit der ExpertInnen). Die Interviews dauerten zwischen 30 und 60 Minuten und waren auf einen Fragenkatalog gestützt. Dieser Fragenkatalog besteht aus je zwei offenen Fragen zu den vier Bereichen: *Forschungsinhalt*, *Forschungsmethoden*, *Kontexte* und *Interesse* (vgl. Tabelle 1). Die Interviews wurden schriftlich (stichpunktartig) festgehalten und danach kategorisiert.

Die Konstruktion der Fragen ergab sich aus der Zielstellung, einen Überblick über die tatsächlichen Inhaltsbereiche der aktuellen Forschung zur nichtlinearen Physik (insbesondere zu den Themenfeldern G und S) zu gewinnen. Dies begründete die beiden Leitfragen zum Forschungsinhalt. Die beiden weiteren Leitfragen betreffen die Forschungsmethoden, denn für die fachliche Klärung ist „die Kenntnis der betreffenden fachwissenschaftlichen Vorstellungen und Methoden unverzichtbar“ ([29], S. 10). Darüber hinaus wurden in Hinblick auf eine spätere kontextbezogene Elementarisierung und Entwicklung von Unterrichtsmaterialien auch die forschungsbezogenen Anwendungsfelder und Phänomenbereiche erfasst. Um die persönliche Perspektive und die Einstellung der Befragten zu ihrem Forschungsbereich und zur Einschätzung der Bedeutsamkeit außerhalb ihres Wirkungsbereichs zu erfassen, wurden zwei

<p><i>A: Forschungsinhalt</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Nennen Sie bitte Ihrer Meinung nach wichtige Erkenntnisse auf Ihrem Forschungsgebiet aus den letzten zehn Jahren. 2. Welches sind Ihrer Meinung nach zukünftig interessante Gebiete Ihres Forschungsbereiches?
<p><i>B: Forschungsmethode</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mit welchen Methoden arbeiten Sie bei Ihrer Forschung? 2. (Welche experimentellen Methoden benutzen Sie?)
<p><i>C: Kontexte</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Was sind (mögliche) Anwendungen Ihrer Forschung? 2. Welche (alltäglichen) Phänomene haben mit Ihrem Forschungsgebiet zu tun?
<p><i>D: Interesse</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Was wäre Ihrer Meinung nach für Nichtphysiker an Ihrem Forschungsgebiet interessant? 2. Was würden Sie aus der Perspektive Ihres Forschungsbereiches in Schule vermitteln?

Tab. 1: Fragenkatalog der ExpertInnenbefragung (Geklammerte Fragenteile wurden abhängig vom Gesprächsverlauf gefragt.)

Fragen auch dazu gestellt. Diese beiden Fragen dienten auch dazu, indirekt nochmals mögliche Kontexte abzufragen.

Die Kontaktaufnahme mit den ExpertInnen erfolgte per E-Mail, und bei positiver Rückmeldung wurde ein Interview durchgeführt. Vor dem eigentlichen Interview wurde eine kurze Einführung in das Anliegen des Projekts gegeben (im Nachgang erhalten die Interviewten die Ergebnisse der Auswertung).

3.2. ExpertInnengruppe

Als ExpertInnen wurden im Rahmen dieser Befragung die WissenschaftlerInnen angesprochen, die sich zum Zeitpunkt der Befragung in der Forschung fachwissenschaftlich mit den Themen G und/oder S beschäftigen. Die Wahl der ExpertInnen wurde initial durch eine Internetrecherche begonnen. Nach jedem Interview wurde jede/r GesprächspartnerIn nach weiteren ExpertInnen auf dem Gebiet der G und S gefragt. Auf diese Weise wurde sukzessive in einer Art ‚peer-review‘-Verfahren eine ExpertInnengruppe zusammengestellt. Damit sollte auch dem in der Literatur beschriebenen Problem begegnet werden, wie ExpertInnen zu definieren sind [7].

Insgesamt wurden 27 ExpertInnen (davon 2 weiblich und 25 männlich) befragt (siehe Tabelle 2).

Gruppenzuordnung	
Positionen	Fächer
18 ProfessorInnen	17 Experimentalphysik
7 Postdocs	7 Theoretische Physik
2 Doktorand (nur männliche)	3 Sonstige (Bio-Physik, Chemie, Mathematik)

Tab. 2: Berufsgruppen der ExpertInnen

In Abbildung 1 ist die Vernetzung der einzelnen ExpertInnen dargestellt. Es zeigt sich, dass die am häufigsten genannten ExpertInnen interviewt werden konnten. Die beiden unvernetzten Interviewten (dunkle Kreise oben links und oben rechts in Abbildung 1) wollten keine anderen ExpertInnen benennen. Insgesamt wurden 120 ExpertInnen benannt, davon wurden 36 ExpertInnen mindestens zweimal benannt (von denen 16 interviewt wurden) und 20 ExpertInnen mindestens dreimal benannt (von diesen wurden 12 interviewt).

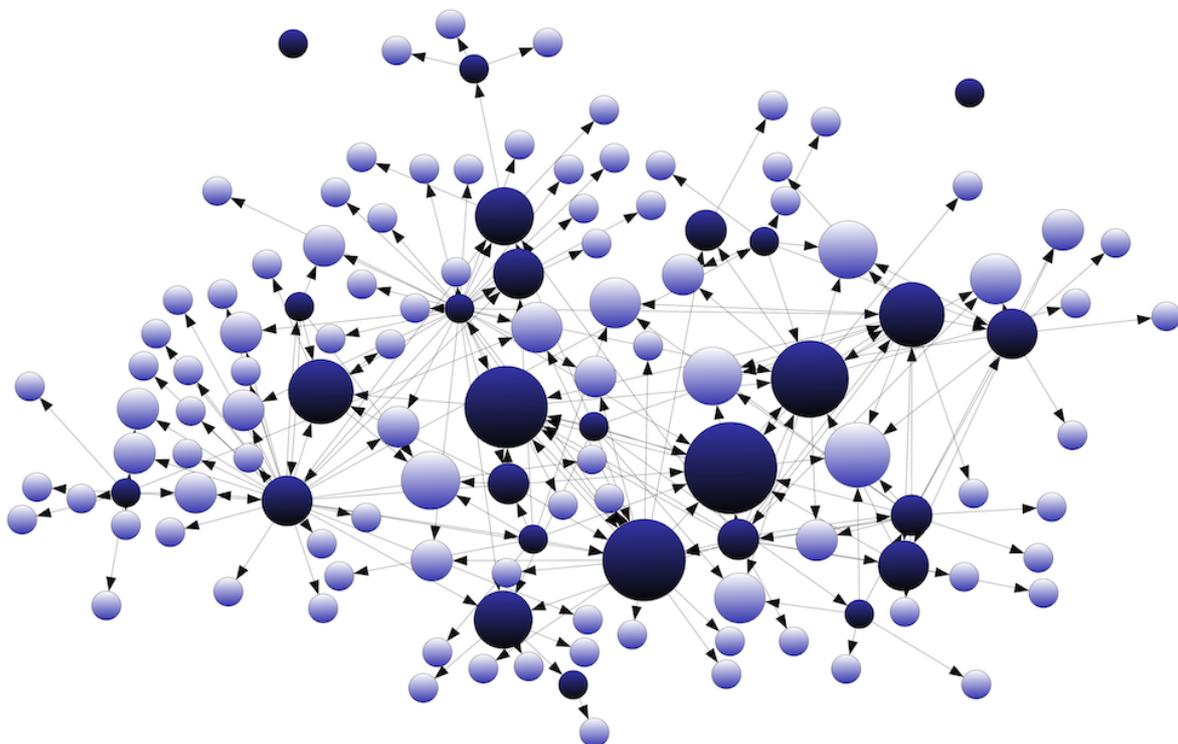


Abb. 1: Vernetzung der ExpertInnen: Jeder Knoten stellt eine/n ExpertIn dar. Jeder Pfeil ist eine Nennung. Dunkel dargestellt sind die interviewten Personen (N = 27). Die Fläche der Knoten ist proportional zur Anzahl der Nennungen.

4. Ergebnisse

Mit Hilfe der Interviews konnten Bereiche identifiziert werden, welche eine mögliche Strukturierung des Sachgebietes ermöglichen (vgl. Tabelle 3 und 4). Bei den Tabellen wird zusätzlich in visionäre und aktuelle Bereiche unterschieden, wie es die beiden Fragen aus dem Fragenkatalog zum Forschungsinhalt machen. Dabei ist die Bedeutung so zu verstehen, dass visionäre Themenfelder nahezu ‚unbeforscht‘ sind und es sich dabei um Ideen für zukünftige Forschungsprojekte handelt.

Nachfolgend werden die einzelnen Bereiche detaillierter beschrieben, entweder auf Basis der Ausführungen der ExpertInnen oder nach eigener Recherche (speziell für die fachwissenschaftliche und fachdidaktische Literatur). Zusätzlich ist bei den Forschungsbereichen angegeben, ob dazu bislang nur auf fachwissenschaftliche (FW) oder auch schon auf fachdidaktische Literatur (FD) verwiesen werden kann.

Die angegebenen Häufigkeiten bezeichnen immer den Umstand, ob eine Person einen Bereich benannt hat oder nicht, unabhängig davon, wie oft eine Person einen Bereich benannt hat. Wenn eine Person mehrere unterschiedliche Beispiele zu einem Bereich genannt hat, wurde dies nur einmal gezählt.

Thema (G u./o. S)	Anzahl ExpertInnen	aktuell oder visionär	Forschungsbereich
S	19	a v	Bedingungen der Strukturentstehung
G	15	a	Jamming
G S	11	a v	Aktive Teilchen
S	11	v	Struktursteuerung und Strukturzeugung
G	10	a	Segregation
S	9	a v	Synchronisation
G	9	a v	Packungsfragen und Kompaktifizierung
S	8	a	Nichtlineare partielle DGL
G	8	a	Feuchte/Nasse Granulaten
G	7	a	Kontaktnetzwerk-konzept
G S	7	a	Konvektionsrollen
G	6	a	Paranusseffekt
G	4	a	Clusterbildung (Entstehung astronomischer Körper)
G	4	a v	Phasenübergang zweiter Art (Glas)
G	4	a	Schallausbreitung in granularer Materie
S	4	a	Rissbildung
S	4	a v	Mathematische Modellierung (Netzwerk)
G	1	a	Granular Ratchet (Energiegewinnung)

Tab. 3: Nennungen der ExpertInnengruppe zu Forschungsbereichen (N = 27); Zuerst steht thematische Zuordnung, dann folgt die Anzahl der ExpertInnen, die diese Option benannt haben, danach erfolgt die Zuordnung zu aktuellem und/oder visionärem Forschungsgebiet und als letztes ein Überbegriff für den Bereich.

4.1. Forschungsbereiche (sortiert nach Tab. 3)

Bedingungen der Strukturentstehung (FW & FD)

steht für die Bedingungen, unter denen sich ein Muster bilden kann. Ein einfacher Ansatz dazu ist, dass eine dissipative Struktur überall da entstehen kann, wo ein Fließgleichgewicht¹ vorliegt und ein nichtlineare Vorgang beteiligt ist. Häufig wird dies mit nichtlinearen Differentialgleichungen (DGL) modelliert. Aktuelle Forschungsansätze stoßen hier in den Bereich der Biologie vor [46]. Ebenso gibt es bereits dazu fachdidaktische Untersuchungen zu Umsetzungsschwierigkeiten der nichtlinearen Dynamik [33] und ein Schulbuch, dass das Thema Strukturbildung behandelt [8].

Jamming (FW)

bezeichnet den Zustand eines granularen Systems, in dem das Verhalten von flüssigkeitsartig zu festkörperähnlich umschlägt, im Sinne von Stauen oder Verklemmen. In den letzten Jahren hat sich die Theorie des Jamming-Phasendiagramms als geeignet erwiesen die experimentellen Ergebnisse zu ordnen. Darin ist ein Bereich als ‚jammed‘ zugeordnet, der abhängig ist von der (granularen) Temperatur, der Scherung und der reziproken Teilchendichte. Ein ‚jammed‘-Zustand tritt eher auf bei großer Teilchen-

dichte, geringen Temperaturen oder/und geringen Scherungen [37]. Diese Jamming-Theorie hat den Charakter einer großen vereinheitlichten Theorie, da sie auch für die Beschreibung des Verhaltens von Polymeren und glasartigen Systemen genutzt wird.

Aktive Teilchen (FW)

sind Teilchen, die einen eigenständigen Antrieb haben. Darunter fallen Untersuchungen von Tier-schwärmen oder von Kleinstlebewesen [41], genauso wie experimentelle Settings, in denen sogenannte Janus-Teilchen (Name abgeleitet von der Zweiseitigkeit) eingesetzt werden [27]. Letztere sind einseitig behandelt, so dass sie mit dem umgebenden Medium reagieren und damit einen Bewegungsantrieb erzeugen.

Struktursteuerung und Strukturzeugung (FW)

bezeichnen Ansätze, die versuchen die Entstehung von Strukturen nutzbar zu machen, z. B. für visionäre Ideen, wie die Veränderung von Landstrichen oder zur Oberflächenbeschichtung (z. B. mit Lacken), zum Wachstum von Halbleiter- oder Nanostrukturen und sogar zur Steuerung biologischer Systeme. Diese Ansätze stecken größtenteils noch in den Kinderschuhen [61].

Segregation (FW & FD)

bezeichnet das Verhalten der Entmischung von granularer Materie, wenn diese mechanisch angeregt wird bzw. ist (z. B. durch schütteln oder schütten) und ist eine Verallgemeinerung des Paranusseffekt. Bei der Segregation wird vorrangig mit experimen-

¹ Ein Fließgleichgewicht ist ein stationärer Zustand bei dem Substanzen ein System durchfließen und ggf. umgesetzt werden. Ergo ist das System nicht im (thermodynamischen) Gleichgewicht.

tellen Settings und Simulationen gearbeitet. Es scheint bis dato keinen wirksamen und weitreichenden theoretischen Ansatz zu geben, sondern jede Situation wird neu analysiert [24]. Didaktisch wurden bereits fachliche Klärungen und Experimentalanleitungen gegeben [17][74][77].

Synchronisation (FW)

beschreibt das Verhalten von gekoppelten Systemen. Dabei wird versucht mit verschiedenen Arten von DGLs zu klären, wie Individuen einer Gruppe sich selbstständig auf einen gemeinsamen Rhythmus einstellen (z. B. Nervenzellen bei Parkinsonerkrankungen, Tiere in einer Tierpopulationen und Herzschläge während einer Herzrhythmusstörung) [70].

Packungsfragen und Kompaktifizierung (FW & FD) beschreiben die Untersuchung von möglichen Packungsdichten in Granulaten. Also wie viele Teilchen pro Raumeinheit untergebracht werden können. Dies wird aktuell und zukünftig vor allem für die Packung irregulärer Körper [21] und für zufällig angeordnete Packungen untersucht [64]. In fachdidaktischen Schriften wird die Packungsdichte nicht zufällig angeordneter, regulärer Körper behandelt [76].

Nichtlineare partielle DGL (FW & FD)

sind ein erprobtes Werkzeug, mit denen aktuell Strukturbildungsprozesse beschrieben werden können und auch untersucht werden [4]. Spezialfälle werden auch in der fachdidaktischen Literatur besprochen (z. B. bei [59]).

Feuchte/Nasse Granulaten (FW)

Dabei wird untersucht, wie sich granulare Materie zusammen mit Flüssigkeiten verhält, wie sie häufig in der Realität vorliegen (z. B. Sand mit Wasser am Strand). Es zeigt sich, dass das Verhalten von Granulaten in einem weiten Bereich der Feuchtigkeit unverändert ist und das feuchte Granulate auch einen Phasenwechsel im angeregten Zustand aufweisen (festkörperähnlich, flüssigkeitsähnlich oder auch gasähnlich). Dies geschieht aber aufgrund anderer Mechanismen [53].

Kontaktnetzwerkkonzept (FW & FD)

Es bilden sich in granularen Medien bestimmte Pfade aus, die einen Großteil der Last tragen. Dies kann visualisiert (fachdidaktisch bei [5]) und auch bereits gut simuliert werden (fachdidaktisch [76], fachwissenschaftlich [39][73]). Dieses Verhalten ist verantwortlich für die ungleichmäßige Lastverteilung von Schüttgütern.

Konvektionsrollen (FW & FD)

bilden sich in Flüssigkeiten aus, wenn an den Grenzen der Flüssigkeit ein ausreichend großer Temperaturunterschied vorliegt (Bsp. Bénard-Experiment, fachdidaktisch bearbeitet bei [47]). Sie finden sich auch in den Geowissenschaften bei Steinkreisen am Boden [11][20], oder auch bei manchen Wolkenformationen. Im Gegensatz zu Konvektionszellen in Flüssigkeiten wurden diese Phänomene bislang eher selten untersucht.

Paranusseffekt (FW & FD)

bezeichnet das Verhalten in einer granularen Mischung, bei der durch Vibration große Granulate nach oben gelangen. Dieser Effekt ist bereits gut untersucht (fachdidaktisch [60]), aber die vollständige Klärung ist äußerst schwierig, bedingt durch die große Anzahl der Parameter. Zusätzlich gibt es den inversen Paranusseffekt. Zentrale Mechanismen sind u. a. Seitenwand getriebene Konvektionsrollen und Löcherfüll-Mechanismen (große Granulate können nur in große Löcher rutschen, kleine Granulate in große und kleine Löcher) [75][65].

Clusterbildung (FW)

bezeichnet einen Mechanismus, bei dem aus interstellaren Staub eine größere Aggregationen von Materie angesammelt wird, was eine Grundlage für die Entstehung von Himmelskörpern in der Größenordnung von wenigen Millimetern zu mehreren Kilometern sein könnte ([2], S. 29ff).

Phasenübergang zweiter Art (FW)

Gemeinhin bekannt ist der Phasenübergang erster Art, bei dem bei der Änderung des Aggregatzustandes eine bestimmte Wärmemenge nötig ist bzw. freigesetzt wird. Dies ist z. B. bei Glas anders. Es kann ebenso seinen Aggregatzustand verändern, aber ohne eine Schmelzenthalpie [72]. Solche Phasenübergänge finden sich auch in angeregter granularer Materie [35].

Schallausbreitung in granularer Materie (FW)

Je nach Medium verändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls, diese ändert sich auch in Granulaten abhängig von der Beschaffenheit und der Art des Kontaktnetzwerkes. Ebenso gibt es den Effekt der singenden Dünen, dessen zugrundeliegende Mechanismen vor kurzem geklärt werden konnten [31].

Rissbildung (FW)

Hierbei wird z. Zt. vorrangig experimentell untersucht, wie sich Risse bilden. Es ist leicht vorherzusagen wann Risse auftreten, aber es ist schwierig vorherzusagen, wie die Risse verlaufen werden [19]. Ebenso wird dies für Modelle der Erdkruste benutzt, wo mit Wachs die Plattentektonik in kürzester Zeit modelliert werden kann [63].

Mathematische Modellierung (Netzwerk) (FW)

Weitverbreitet ist die Modellierung dissipativer strukturbildender Systeme mit Hilfe eines Kontinuums mit nichtlinearen partiellen DGLs. Ein neuerer Modellierungsansatz besteht aus einem Netzwerk von Knoten, die lediglich über nichtlineare nichtpartielle (einfache) DGLs miteinander interagieren. Auch diese Systeme können strukturbildendes Verhalten zeigen [23].

Thema (G u./o. S)	Anzahl ExpertInnen	aktuell oder visionär	Kontext (Anwendungs- und Phänomenbereiche)
G S	18	a	Geowissenschaften
S	15	a v	Biologie
G	11	a	Küchenphysik
G	10	a v	Ressourcengewinnung
S	10	a v	Sozio-Ökonomisch
G S	9	a v	Medizin
G	9	a	Verpackungsindustrie / Transportindustrie
G	7	a v	Katastrophenhilfe
S	7		Strukturherstellung
G S	6	a	Architektur und Bau
G S	6	-	Nicht anwendungsorientiert / Grundlagenforschung
G	6	a v	Pharmazie
S	4	a	Astronomie (Clusterbildung)
G	4	a v	Müllsortierung
S	4	a	Philosophie (Ursprung des Lebens)
G	2	a	Gussverfahren
S	2	v	Mikrofabriken / zelluläre Fabriken
G	1	a	Energiegewinnung (Granular Ratchet)
S	1	a	Kryptographie

Tab. 4: Nennungen der ExpertInnengruppe zu Forschungsbereichen (N = 27); Zuerst steht thematische Zuordnung, dann folgt die Anzahl der ExpertInnen, die diese Option benannt haben, danach erfolgt die Zuordnung zu aktuellem und/oder visionärem Forschungsgebiet und als letztes ein Überbegriff für den Bereich.

Granular Ratchet (Energiegewinnung) (FW)

Ein einfacher Aufbau kann aus der ungerichteten Vibration eines granularen Gases² nutzbare Energie umwandeln, ohne dass ein anderes granulares Gasdepot mit einer unterschiedlichen Temperatur vorhanden ist, wie es in der Thermodynamik immer gefordert ist [15]. Der Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen. Das Rad wird nun in ein granulare Gas gehalten und erhält dort zufällig Impulse mit verschiedenen Stärken. Dadurch wird es zufällig links- oder rechts herum gedreht. Wenn der Impuls stark genug ist, dass ein Zahn der Ratsche überwunden wird, dann verhindert die Ratsche das Zurückdrehen, folglich kann Arbeit verrichtet werden. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch die einseitige Beschichtung des Rades durch eine stoßabsorbierende Oberfläche.

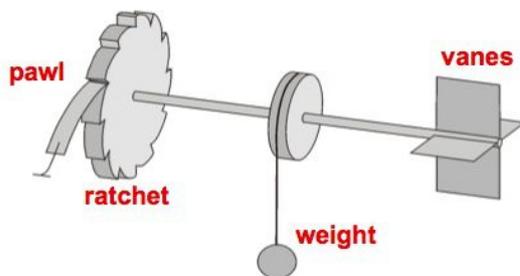


Abb. 2: Aufbau einer granularen Ratsche; Quelle: http://pof.tnw.utwente.nl/3_research/pics/g_ratchet.jpg

3.2. Kontexte (sortiert nach Nennungszahl)

Geowissenschaften (FW & FD)

Anwendungen sind zum einen das Verstehen von Vorgängen ‚der Erde‘. Darunter fallen: die Analyse von Lawinen und Erdbeben (Unter welchen Bedingungen fluidisiert sich ein Granulat?), die bereits genannte Untersuchung von Rissbildungen, die Analyse der Plattentektonik, die Untersuchungen von Strukturen im Boden [11][20], das Mäandern von Flüssen (bereits didaktisch bearbeitet [49]), die Bildung von hexagonalen Basaltsäulen und die Deformation von Böden (langsameres Absacken von Böden).

Zum anderen lassen sich die Bereiche „Wüste“ und „Sand“ als extra Themengruppe zusammenfassen, worunter die Dünenwanderung, Wüstenwanderung (und dem Schutz bzw. der Vorhersage zu eben jener) sowie die Strukturbildung im Sand fällt (fachdidaktisch bearbeitet bei [59]). Aber auch Untersuchung zum Verhalten von feuchten Granulaten werden durchgeführt [53][38].

Zusätzlich finden sich Anwendungen in der Beschreibung der Atmosphäre und des Wetters. Darunter fallen das Verhalten von Wolken (Bénard-Konvektion in Wolken) oder von Staubwolken [52]. Weitergehend findet sich die Strukturbildung wiederum im Kleinen beim dendritischen Wachstum von Eiskristallen bzw. Schneeflocken [36].

Biologie (FW & FD)

In der Biologie findet sich die Strukturbildung in der Organisation zellulärer und subzellulärer Strukturen wieder [43][10]. Zusätzlich gibt es Anwendung in der Genexpression, wo sich zur Zeit die Vermutung durchsetzt, dass im Gencode viel weniger Information codiert ist, als zuerst angenommen und stattdessen vieles durch Prozesse der Selbstorganisation umgesetzt wird [34].

Aber auch in makroskopischen Bereichen der Biologie findet die Strukturbildung Anwendung, z. B. bei der Analyse von Mustern auf Zebras (bereits länger bekannt und fachdidaktisch bearbeitet bei [25]) oder der Synchronisation von Tieren in Lebenszyklen oder Handlungen.

Küchenphysik (FD)

Dieser Themenbereich wurde bereits didaktisch bearbeitet [48] und beschäftigt sich mit Phänomenen der Segregation (im Besonderen auch mit dem Pannuss-Effekt), die man sehr gut mit Granulaten, die man in einer Küche findet, erzeugen kann. Weitere Phänomene sind Schüttwinkel, kompaktifizierte Granulate (wie z. B. bei vakuumverpackten Kaffee) und Verstopfen von Schüttbehältern, wenn man zu stark schüttet (Jamming und Brückenbildung bzw. Kontaktnetzwerke).

Ressourcengewinnung (FW)

Mögliche Anwendungen in der Ressourcengewinnung sind eine Verbesserung des Transportes granularer Güter (z. B. auf Schwingförderern [54]) und die Möglichkeiten Segregationsmechanismen besser in der Förderung von z. B. Kohle zu nutzen (um Kohle und Gestein von einander zu trennen). Ebenso wurden mögliche zukünftige Anwendungen genannt, bei denen mit Schalluntersuchungen in granularer Materie unterirdische Rohstoffvorkommen gefunden werden könnten [51].

Sozio-Ökonomisch (FW & FD)

Dabei geht es einerseits um Schwarm- bzw. Gruppenverhalten von Lebewesen, die dabei Strukturen bilden [79], aber es wurden auch mögliche Anwendungen in der Wirtschaftswelt genannt [50] oder auch wie sich zeitliche Strukturen in Stromversorgungsnetzen bilden. Ein bekanntes Beispiel der Anwendung ist das Nagel-Schreckenberg-Modell, welches den Autoverkehr simuliert und sehr gut das Auftreten von Staus ohne konkrete Ursache erklärt (fachdidaktisch bearbeitet bei [9]). Dieses Modell ist verwandt mit den Modellen, die das Verhalten granularer Materie beschreiben.

Medizin (FW)

Zum einen wurde die Anwendung in den Neurosciences genannt, wie z. B. Simulation des Gehirns (um damit das allgemeine Verhalten besser zu verstehen) [14] und im Besonderen wurde das Verhalten des Gehirns unter epileptischen Anfällen oder unter Parkinson, weitergehend auch die Anwendung auf Herzkammerflimmern genannt. Ebenso wurde der mögliche zukünftige Einsatz aktiver Teilchen in der

Pharmazie genannt um Wirkstoffe besser an einen bestimmten Ort zu bringen.

Verpackungsindustrie / Transportindustrie (FW & FD)

Ein Hauptproblem in der Verpackungsindustrie (wie auch in der Ressourcengewinnung) betrifft den Transport von granularen Medien, da diese z. B. in Rohren verklemmen können (fachdidaktisch siehe [17] & [76]). Dies zu untersuchen ist ein primärer Inhalt der Forschung zur granularen Materie ([3], S. 1f). Genauso können Segregationsphänomene ein Problem sein, wenn Stoffgemische transportiert werden. Zwei andere interessante Aspekte sind die Nutzung der Kompaktifizierung von granularer Materie für feste Verpackungen und die Untersuchungen von Packungsdichten kugelig oder unregelmäßiger Körper (um z. B. effizienter packen zu können, siehe auch „Packungsfragen und Kompaktifizierung“).

Katastrophenhilfe (FW)

beschäftigt sich mit dem Verhalten und den Umständen von Erdbeben, Lawinen, Schlammmuränen u. ä. [62][69]. Es existieren aktuell bereits gute Modelle zur Lawinendynamik, die aber noch offene Fragen aufweisen [56]. Weitergehend wurden visionäre Überlegungen genannt Schalluntersuchungen in granularer Materie zum Aufspüren von Minen zu benutzen [51].

Strukturherstellung

Siehe Struktursteuerung.

Architektur und Bau (FW & FD)

Die Anwendungen in der Architektur sind sehr verschiedenen. Einerseits geht es um strukturelle Bedingungen bei der Lagerung granularer Güter z. B. in Silos oder um das Ausleerverhalten von Silos bzw. Gebäuden aus denen Menschen in Paniksituationen ausströmen sollen (was auch mit Simulationen aus dem Bereich der granularen Materie realisiert wird [28]). Andererseits geht es um vorausschauendes Bauen in Wüstenregionen (Gefahren durch Wüstenwanderung) oder um das Verhindern der Versandung von Häfen ([57], S. 1]). Weitere Anwendungsbeispiele sind die London-Millennium-Bridge, bei der sich die Fußgänger von selbst synchronisierten und die Brücke horizontal in Schwingung versetzt haben [12] und die Haltbarkeit von Straßen, die eben aus granularer Materie bestehen [71]. Oder die Anwendung in der Bodenmechanik, wo in Langzeituntersuchungen die Dynamik von Böden untersucht wird (z. B. inwieweit diese unter Last absinken können) [45].

Nicht anwendungsorientiert / Grundlagenforschung

Ein Teil der befragten ExpertInnen gab an, dass Ihre Forschung nicht anwendungsorientiert ist und haben dann teilweise aber noch mögliche Phänomene oder Anwendungen genannt.

Pharmazie (FW)

In der Pharmazie stellt sich vor allem das Problem der Segregation von pulverförmigen (granularen) Wirkstoffen bzw. Trägerstoffen, die vermischt werden müssen, ohne sich zu entmischen [13]. Ebenso

wurde die Idee benannt Nanopartikeln, die durch Strukturbildungsprozesse hergestellt wurden, als Träger von Wirkstoffen zu benutzen.

Astronomie (Clusterbildung)

Siehe Clusterbildung.

Müllsortierung (FW)

In der Müllaufbereitung wird angestrebt Müll (granulare Materie) gezielt durch die Nutzung von Segregationsmechanismen zu trennen [44].

Philosophie (Ursprung des Lebens) {a}

Benannt wurde als Grundgedanke der Strukturbildung, dass ohne intendiertes Zutun in einem offenen System die Entropie exportiert wird. Dies ist stark verknüpft mit der Entstehung von Leben, womit sich Erklärungsansätze liefern lassen, wie das Leben entstehen konnte oder auch wie das Gehirn, obwohl es nur ein Netzwerk ist, eine neue Eigenschaft ‚Bewusstsein‘ besitzt (Prinzip der Emergenz) [22].

Gussverfahren (FW & FD)

Ein übliches Gussverfahren ist das Lost-Foam-Verfahren, bei dem die Form nach dem Gussvorgang verloren geht. Dabei kann auch kompaktifizierter Sand ohne Zusätze (wie Binder) benutzt werden, der danach wieder durch Auflockerung (Fluidisierung) entfernt werden kann [76].

Mikrofabriken / zelluläre Fabriken (FW)

Eine Zukunftsidee ist, dass kleine Zellen via Strukturbildung gezüchtet werden und diese dann z. B. für die Synthese von Chemikalien zu nutzen. Dabei meint Zelle eine kleine Produktionseinheit, die einerseits sich selbst reproduzieren kann und andererseits den gewünschten Prozess durchführt [40].

Energiegewinnung (Granular Ratchet)

Siehe Granular Ratchet (Energiegewinnung).

Kryptographie (FW)

Ein Experte benannte ein Verfahren, bei dem chaotische Laser sich selbst synchronisieren um damit einen Schlüssel zu erzeugen und eine verschlüsselte Kommunikation zu ermöglichen [30].

3.3. Zusätzliche Gebiete

Zusätzlich zur Befragung sind bei der Recherche mehrfach die folgenden Gebiete ausgemacht worden, die nicht durch die ExpertInnen benannt wurden, hier aber genannt werden um den Überblick über das Forschungsfeld zu vergrößern.

zusätzlicher Forschungsbereich

Zelluläre Automaten (FW & FD)

sind ein einfaches Modell, das geeignet ist für die Simulation von granularer Materie oder Strukturbildung. Man betrachtet ein Raster. Jedes Rasterfeld kann verschiedene Zustände einnehmen und es gelten für jedes Rasterfeld die gleichen Regeln. Diese werden in diskreten Zeitschritten gleichzeitig für alle geprüft und danach der entsprechende Zustand eingestellt. Die Regeln beziehen sich auf die Zustände der benachbarten Teilchen. Einen allgemeinen fachwissenschaftlichen Überblick liefert Baumann [3]

und eine fachdidaktische Umsetzung findet sich bei Wirthgen [77].

zusätzliche Kontexte

Greifer

Eine Anwendung in der Robotik ist der Bau eines granularen Greifers. Er besteht aus einem mit Kaffeepulver befüllten Luftballon und einer Pumpe, die einen Unterdruck erzeugt, wodurch das Granulat ‚jammed‘ und Gegenstände damit festgehalten werden können [26]. Dieser Greifer kann verschiedenste Gegenstände ohne Kraftsensorik heben. Ebenso kann dieser Greifer sogar als Werfer eingesetzt werden, indem man schnell den Luftdruck im Ballon erhöht.

Tröpfchenbildung bei fluidisiertem Granulat

Ein unerwartetes Phänomen kann man beobachten, wenn man feine Granulate ($< 100 \mu\text{m}$) durch einen Trichter rieseln lässt. Der Strahl, der aus dem Trichter kommt, wird unterhalb dieser Größenordnung dazu neigen, sich wie ein Wasserstrahl zu verhalten und Tröpfchen zu bilden. Dies kann mit Hilfe einer Highspeedkamera sichtbar gemacht werden (eigenen Untersuchungen gelangen bei 1000 fps). Ähnliche Versuche wurden auch mit locker geschichtetem Natron durchgeführt in welches eine Kugel fallen gelassen wurde [55].

Symmetriebrechung

Wenn man einen Rüttler mit zwei offenen Kammern mit Granulat befüllt (gleichmäßig in beide Kammern), dann kann beim Rütteln das Granulat sich in einer Kammer sammeln. Das Granulat sortiert sich sozusagen selber [42] (fachdidaktisch [59]).

5. Ausblick

In einem nächsten Schritt soll nun die LehrerInnenperspektive zu diesem Themenfeld erfasst werden. In Anknüpfung an die Ergebnisse von Schwarzenberger & Nordmeier [67] werden die LehrerInnen dabei auch zu hemmenden und förderlichen Bedingungen für die unterrichtliche Umsetzung befragt. Auf Basis einer größeren Stichprobe ($N > 100$) soll damit u. a. geklärt werden, welche Umsetzungsschwierigkeiten bei Lehrenden vorzufinden sind. Darauf aufbauend und verzahnt mit den in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnissen der Expertenbefragung sollen dann gezielt Elementarisierungen vorgenommen und entsprechende Unterrichtsmaterialien für den Unterricht entwickelt und evaluiert werden.

6. Literatur

- [1] BAUMERT, J.; BOS, W. & WATERMANN, R. (1998): *TIMSS/III – Schülerleistungen in Mathematik und den Naturwissenschaften am Ende der Sekundarstufe II im internationalen Vergleich*. Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- [2] BADERTSCHER, T. (2003): *Einschlagsexperimente in granulare Medien bei tiefen Geschwindigkeiten*. Dissertation, Universität

- Bern, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät.
- [3] BAUMANN, G. (2007): *Modelle und Computersimulationen granularer Materie*. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg.
- [4] BESTEHORN, M. (2006): *Hydrodynamik und Strukturbildung*. Berlin u. a.: Springer.
- [5] BLEIMLING, T. (2011): *Experimente zu Granulaten mit photoelastischem Effekt*. Bachelorarbeit, Freie Universität Berlin.
- [6] BORTZ, J. & DÖRING, N. (2006): *Forschungsmethoden und Evaluation*. Heidelberg: Springer.
- [7] BOHNSACK, R.; MAROTZKI, W. & MEUSER, M. (2003): *Hauptbegriffe Qualitativer Sozialforschung*. Opladen: UTB Verlag Barbara Budrich.
- [8] BOYSEN, G.; HEISE, H.; LICHTENBERGER, J.; SCHEPERS, H.; SCHLICHTING, H. J.; BOCK, V.; GÖTZ, H.-P.; MUCKENFUSS, H.; NORDMEIER, V. & SCHRÖDER, D. (2000): *Physik Oberstufe, Ausgabe Sachsen-Anhalt, Klasse 11*. Berlin: Cornelsen.
- [9] BRESGES, A. (2006): *Modellierung von Autobahnstaus und Unfallgefahren mit physikalischen Methoden*. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): *Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung der DPG Kassel*.
- [10] CHO, E. J. & KIM, J. S. (2012): *Crowding Effects on the Formation and Maintenance of Nuclear Bodies: Insights from Molecular-Dynamics Simulations of Simple Spherical Model Particles*. In: *Biophysical Journal*, 103 (3), S. 424–433.
- [11] DANIELS, K. (2010): *Convection in Grass*. http://nile.physics.ncsu.edu/cgi-bin/webpage/Research/Patterns_in_Nature/30_grass.html (letzter Zugriff: 08.10.2012).
- [12] ECKHARDT, B.; OTT, E.; STROGATZ, S. H. & ABRAMS, D. M. & McROBIE, A. (2007): *Modeling walker synchronization on the Millennium Bridge*. In: *Physical Review E*, 75 (2), 021110.
- [13] EMERY, E.; OLIVER, J.; PUGSLEY, T.; SHARMA, J. & ZHOU, J. (2009): *Flowability of moist pharmaceutical powders*. In: *Powder Technology*, 189 (3), S. 409–415.
- [14] EPFL (2012): *The Blue Brain Project EPFL*. <http://bluebrain.epfl.ch/page-52658-en.html> (letzter Zugriff: 20.12.2012).
- [15] ESHUIS, P.; VAN DER WEELE, K.; LOHSE, D. & VAN DER MEER, D. (2010): *Experimental Realization of a Rotational Ratchet in a Granular Gas*. In: *Physical Review Letters*, 104 (24), 248001.
- [16] FRIEDRICH, R. (2001): *Nichtlineare Systeme und Strukturbildung*. <http://pauli.uni-muenster.de/Arbeitsgebiete/friedrich/nov.html> (letzter Zugriff: 16.11.2011).
- [17] FROMME, B. (2005): *Feuerräder, Zebrastrreifen und Lawinen - Experimente mit granularer Materie*. <http://www.physik.uni-bielefeld.de/didaktik/Experimente/FeuerraderCD05.pdf> (letzter Zugriff: 04.04.2012).
- [18] GLÄSER, J. & LAUDEL, G. (2009): *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. Wiesbaden: VS Verlag.
- [19] GOEHRING, L. (2008): *On the scaling and ordering of columnar joints*. PhD-Thesis, University of Toronto.
- [20] GOEHRING, L. (2011): *Freeze-thaw patterns in the laboratory*. <http://www.dcf.ds.mpg.de/index.php?id=759&L=3> (letzter Zugriff: 08.10.2012).
- [21] DE GRAAF, J.; VAN ROIJ, R. & DIJKSTRA, M. (2011): *Dense Regular Packings of Irregular Nonconvex Particles*. In: *Phys. Rev. Lett.*, 107 (155501).
- [22] HECKL, W. M. & SOWERBY, S. J. (2001): *Theorien zur Entstehung des Lebens – Die mögliche Rolle von selbstorganisierten DNA-Basen für die Emergenz von Leben*. <http://www.nano-science.de/external/research/publications/own-papers/TheorienLeben.pdf> (letzter Zugriff: 20.12.2012).
- [23] HEILIGENTHAL, S.; DAHMS, T.; YANCHUK, S.; JÜNGLING, T.; FLUNKERT, V.; KANTER, I.; SCHÖLL, E. & KINZEL, W. (2011): *Strong and weak chaos in nonlinear networks with time-delayed couplings*. In: *Phys. Rev. Lett.*, 107, 234102.
- [24] HERRMANN, H. J. (1995): *Die wunderbare Welt der Schüttgüter*. In: *Physikalische Blätter*, 51, S. 1083–1086.
- [25] HUISKEN, R.; NORDMEIER, V. & SCHLICHTING, H. J. (2003): *Woher hat das Zebra seine Streifen?*. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): *Didaktik der Physik*. Augsburg 2003. Berlin: Lehmanns. CD.
- [26] JAEGER, H. M. (2011): *Elastic Gripper, Thrower und JammingBot*. http://jfi.uchicago.edu/~jaeger/group/Soft_Robotics/Details/Entries/2009/8/28_JamBot_A_new_type_of_soft_robot.html (letzter Zugriff: 03.04.2012).
- [27] JIANG, S. (2009): *Janus Particles*. http://mit.edu/sjiang2/www/Janus_introduction.html (letzter Zugriff: 18.12.2012).
- [28] JOHANSSON, A.; HELBING, D.; AL-ABIDEEN, H. Z. & AL-BOSTA, S. (2008): *From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis*. In: arXiv:0810.4590.
- [29] KATTMANN, U.; DUIT, R.; GROPENGIESSER, H. & KOMOREK, M. (1997): *Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3 (3), S. 3–18.
- [30] KINZEL, W. & KANTER, I. (2008): *Handbook of Chaos Control - Chapter: Secure Communication*.

- tion with Chaos Synchronization. Weinheim: Wiley-VCH.
- [31] KEHSE, U. (2005): *Wenn Dünen singen*. <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/257682.html> (letzter Zugriff: 08.10.2012).
- [32] KOMOREK, M.; WENDORFF, L. & DUIT, R. (2002): *Expertenbefragung zum Bildungswert der nichtlinearen Physik*. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 8 (1), S. 33–51.
- [33] KORNECK, F. (2001): *Chaos – Fraktale – Strukturen oder Von den Schwierigkeiten die nichtlineare Dynamik zu den Schülern zu bringen*. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung 2001 Bremen.
- [34] KOSAK, S. T. & GROUDINE, M. (2004): *Form follows function: the genomic organization of cellular differentiation*. In: Genes Dev., 18, S. 1371–1384.
- [35] KRÜLLE, C. (2006): *Rock 'n' Roll in der Petrischale*. In: Physik Journal, 5 (8), S. 18–19.
- [36] LIBBRECHT, K. G. (2011): *A Snowflake Primer*. <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/primer/primer.htm> (letzter Zugriff: 19.12.2012).
- [37] LIU, A. J. (2010): *Jamming and the glass transition*. <http://www.physics.upenn.edu/liugroup/jamming.html> (letzter Zugriff: 08.10.2012).
- [38] HERMINGHAUS, S. (2008): *Warum Sandburgen bauen einfach ist*. In: Physik in unserer Zeit, 39 (3), S. 110–111.
- [39] HERRMANN, H. J. & LUDING, S. (1998): *Modeling granular media on the computer*. In: Continuum Mechanics and Thermodynamics, 10 (4), S. 189–231.
- [40] MARIENHAGEN, J. & BOTT, M. (2012): *Metabolic engineering of microorganisms for the synthesis of plant natural products*. J. Biotechnol. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.06.001>
- [41] MENON, G. I. (2000): *Active Matter*. In: eprint arXiv: 1003.2032, cond-mat.soft.
- [42] MIKKELSEN, R.; VAN DER WEELE, K.; VAN DER MEER, D.; VERSLUIS, M. & LOHSE, D. (2003): *Competitive Clustering in a Granular Gas*. http://pof.tnw.utwente.nl/3_research/3_galley.html (letzter Zugriff: 13.12.2011).
- [43] MISTELI, T. (2001): *The concept of self-organization in cellular architecture*. In: Journal of Cell Biology, 155 (2), S. 181–186.
- [44] MOHABUTH, N. & MILES, N. (2005): *The recovery of recyclable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by using vertical vibration separation*. In: Resources, Conservation and Recycling, 45 (1), S. 60–69.
- [45] NENDZA, M. (2006): *Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens*. Dissertation, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- [46] NEWELL, A. C. (2011): *Plant patterns and plant phyllotaxis*. <http://math.arizona.edu/~anewell/research.php> (letzter Zugriff: 20.12.2011).
- [47] NORDMEIER, V. & SCHLICHTING, H. J. (2003): *Chaos für die Schule! – Nichtlinearität und Strukturbildung*. In: Physik in unserer Zeit, 34 (1), S. 32–39.
- [48] NORDMEIER, V. & SCHLICHTING, H. J. (2008): *Physik beim Frühstück*. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik, 19 (105/106), S. 12–16.
- [49] NORDMEIER, V.; ZEIGER, C. & SCHLICHTING, H. J. (1999): *Flußnetzwerke – Strukturbildung in der natürlichen Umwelt*. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): Didaktik der Physik, Vorträge der Frühjahrstagung der DPG Ludwigsburg, S. 513–518.
- [50] PHYSIKJOURNAL (2003): *Die Physik sozio-ökonomischer Systeme behandelt gesellschaftliche und wirtschaftliche Phänomene mit physikalischen Methoden*. Themenheft (05/2003). http://www.pro-physik.de/details/physikjournalIssue/1089807/Issue_5_2003.html#1090871 (letzter Zugriff: 20.12.2012).
- [51] OWENS, E. T. & DANIELS, K. E. (2011): *Sound propagation and force chains in granular materials*. In: EPL (Europhysics Letters), 94, 54005.
- [52] PUDASAINI, S. P. & HUTTER, K. (2007): *Avalanche Dynamics*. Berlin Heidelberg: Springer.
- [53] ROELLER, K. & HERMINGHAUS, S. (2011): *Solid-fluid transition and surface melting in wet granular matter*. In: EPL (Europhysics Letters), 96 (2), 26003.
- [54] ROUIJAA, M.; KRÜLLE, C.; REHBERG, I.; GROCHOWSKI, R. & WALZEL, P. (2004): *Transportverhalten und Strukturbildung granularer Materie auf Schwingförderern*. In: Chemie Ingenieur Technik, 76 (1–2), S. 62–65.
- [55] ROYER, J. R. (2006): *BakingSodaJets*. <http://mrsec.uchicago.edu/~jaeger/group/granular2/jets.html> (letzter Zugriff: 26.08.2011).
- [56] RUDOLF-MIKLAU, F. & SAUERMOSE, S. (2011): *Handbuch Technischer Lawinenschutz*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [57] SCHÄFER, J. (1996): *Rohrfluß granularer Materie: Theorie und Simulationen*. In: Berichte des Forschungszentrums Jülich, Jül-3214.
- [58] SCHLICHTING, H. J.; BACKHAUS, U. & KUEPKER, H. G. (1991): *Chaos beim Wasserrad – ein einfaches mechanisches Modell für das Lorenz-System*. In: Physik und Didaktik, 19 (3), S. 196–219.
- [59] SCHLICHTING, H. J. & NORDMEIER, V. (1996): *Strukturen im Sand – Kollektives Verhalten*

- und Selbstorganisation bei Granulaten. In: MNU, 49 (6), S. 323–332.
- [60] SCHLICHTING, H. J.; NORDMEIER, V. & JUNGSMANN, D. (1996): *Die Großen landen immer oben - Phänomene der Selbstorganisation beim Schütteln von Kugeln*. In: Physik in der Schule, 34 (5), S. 191–193.
- [61] SCHÖLL, E. (2010): *Pattern formation and time-delayed feedback control at the nano-scale in Nonlinear Dynamics of Nanosystems*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [62] SCHULZ, B. M. & SCHULZ, M. (2006): *The dynamics of wet granular matter*. In: Journal of Non-Crystalline Solids, 352 (42–49), S. 4877–4879.
- [63] SCHRÖDER, T. (2008): *Die Welt im Wachstumsmodell*. In: MaxPlanckForschung, (1), S. 30–35.
- [64] SCHRÖTER, M.; GOLDMAN, D. I. & SWINNEY, H. L. (2005): *Stationary state volume fluctuations in a granular medium*. In: Phys. Rev. E, 71, 030301(R).
- [65] SCHRÖTER, M.; ULRICH, S.; KREFT, J.; SWIFT, J. B. & SWINNEY, H. L. (2006): *Mechanisms in the size segregation of a binary granular mixture*. In: Physical Review E, 74 (1), 011307.
- [66] SCHWARZENBERGER, P. & NORDMEIER, V. (2005): *Chaos im Physikunterricht*. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Berlin 2005.
- [67] SCHWARZENBERGER, P. & NORDMEIER, V. (2007): *CiPU - Chaos im Physik-Unterricht. Begeisternd, bereichernd, belastend? Die thematische Dimension der Lehrerentscheidung*. In: CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Physikertagung Regensburg 2007.
- [68] SCHWARZENBERGER, P. & NORDMEIER, V. (2008): *CiPU: "Das ist 'ne Frage der Ökonomie natürlich" - die konfliktive Dimension*. In: Höttecke, D. (Hrsg.): Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Essen 2007. Münster: Lit, S. 152–154.
- [69] SPIKER, E. C. & GORI, P. L. (2003): *National Landslide Hazards Mitigation Strategy – A Framework for Loss Reduction*. Reston, Virginia: U. S. Geological Survey.
- [70] STROGATZ, S. H. (2001): *Exploring complex networks*. In: Nature, 410 (8), S. 268–276.
- [71] TABERLET, N.; MORRIS, S. W. & MCELWAINE, J. N. (2007): *Washboard Road: The Dynamics of Granular Ripples Formed by Rolling Wheels*. In: Physical Review Letters, 99 (6), 068003.
- [72] TARIJUS, G. (2010): *An overview of the theories of the glass transition*. In: ArXiv e-prints, 1010.2938.
- [73] TIGHE, B. P.; SNOEIJER, J. H.; VLUGT, T. J. H. & VAN HECKE, M. (2010): *The force network ensemble for granular packings*. In: Soft Matter, 6, S. 2908–2917.
- [74] TOMAS, A. (2007): *Experimentelle Untersuchungen zum Themenbereich 'Granulare Physik'*. Masterarbeit, Freie Universität zu Berlin.
- [75] ULRICH, S. & SCHRÖTER, M. (2007): *Der Pannuss-Effekt*. In: Physik in unserer Zeit, 38 (6), S. 266–267.
- [76] WEBER, S. M. (2006): *Granulare Materie I, Schüttgut in Ruhe - ein ungewöhnlicher Festkörper*. http://www.physikdidaktik.uni-bayreuth.de/projekte/piko/GranulareMaterieI_WeberSM.pdf (letzter Zugriff: 20.09.2011).
- [77] WIRTHGEN, S. (2011): *Granulare Materie – ausgewählte Experimente und Simulationen*. Masterarbeit, Universität Leipzig.
- [78] WISSLER, C. (2010): *Weder fest noch flüssig: Granulare Materie im Visier der Experimentalphysik*. <http://www.uni-bayreuth.de/blick-in-die-forschung/35-2010.pdf> (letzter Zugriff: 20.09.2011).
- [79] Hemelrijk, C. K.; Hildenbrandt, H. (2012): *Schools of fish and flocks of birds: their shape and internal structure by self-organization*. In: Interface Focus, in press.