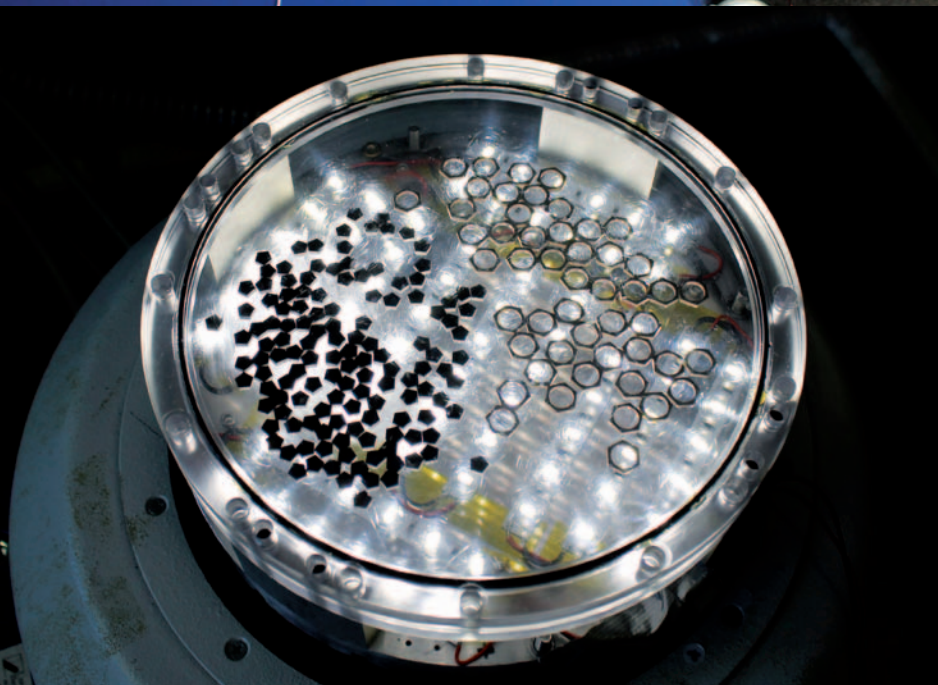


NICHTLINEARE DYNAMIK

KAI HUANG  
INGO REHBERG

# Digitalisierung in der Messtechnik

UNTERSUCHUNGEN ZUR  
NICHTLINEAREN DYNAMIK  
VON SCHÜTTGÜTERN



Oben: PD Dr. Kai Huang an einer Schüttelmaschine in einem Bayreuther Labor zur Untersuchung der nichtlinearen Dynamik fester Partikel. Unten: Geometrisch unterschiedliche Partikel, deren Verhalten während des Schüttelvorgangs von einer darüber installierten Kamera erfasst wird (Fotos: Christian Wißler).

„Die ganzen Zahlen hat der liebe Gott gemacht, alles andere ist Menschenwerk.“ Dieser Satz des Mathematikers Leopold Kronecker (1823 - 1891) wird von manchen Studierenden im ersten Semester als „höherer Blödsinn“ belächelt: Spielt sich denn das Weltgeschehen nicht auf einem Raum-Zeit-Kontinuum ab, in dem die reellen Zahlen – die auch die Bruchzahlen und die irrationalen Zahlen umfassen – das Maß aller Dinge sind? Einige der typischen Demonstrationsversuche für die angehenden Naturwissenschaftler bestärken die Zweifler wohl in ihrem Weltbild. So wird die gravitatorische Anziehung von zwei Massen mit Hilfe eines an der Hörsaalwand entlang wandernden Lichtpunktes demonstriert. Die Strecke dieses „Wanderwegs“, die etwas über die Stärke der Gravitationskraft aussagt, ist ein räumliches Kontinuum und damit eine analoge, nicht-digitale Größe.

Ein alltägliches Beispiel für ein analoges Messgerät ist die Analoguhr, die mit ihren Zeigern ein zeitliches Kontinuum abbildet. In dem Moment, wo wir die Uhr ablesen und feststellen „Es ist jetzt Viertel nach Elf!“, haben wir jedoch schon eine Digitalisierung dieses Wertes vorgenommen – und damit Kronecker wieder die ihm gebührende Ehre erwiesen. Im Sinne dieser vergrößernden Zeitangabe ist jede quantitative Messung einer physikalischen Größe seit jeher eine digitale Angelegenheit.

Seit einigen Jahrzehnten aber wird fast jeder Messvorgang von digitaler Technik dominiert. Fast immer wird die Digitalisierung der Messwerte automatisch vorgenommen, also nicht mehr von einer Person, die ein Messgerät betätigt und abliest. Auch die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung der Messungen werden digital unterstützt. Dies zeigen beispielhaft die Forschungsarbeiten zum Bewegungsverhalten granularer Materie, die an der Universität Bayreuth im Profildfeld „Nichtlineare Dynamik“ angesiedelt sind.

## HERAUSFORDERUNG FÜR DIE INDUSTRIE: DIE VERARBEITUNG VON SCHÜTTGÜTERN

Granulare Materie ist ein Ensemble von Festkörperpartikeln. Nicht nur Sand, Kies oder geschredderter Abfall, sondern auch manche Nahrungsmittel zählen dazu – wie etwa Getreide, Müsli oder ‚Studentenfutter‘. In den Laboren des Lehrstuhls Experimentalphysik V wird die kollektive Dynamik

solcher Feststoffteilchen untersucht, die mit Blick auf ihre industrielle Verarbeitung auch Schüttgüter genannt werden. Die Forschungsarbeiten haben eine konkrete technologische Motivation: Zahlreiche Industriezweige stehen vor der Aufgabe, große Mengen granularer Materie zu transportieren, zu sortieren, zu mischen oder zu verpacken. Die beim Transport von Sand bewährten Förderbänder eignen sich freilich nicht in der Lebensmittelindustrie. Denn hier bestünde die Gefahr, dass Gummibtrieb die Nahrung verunreinigt.

Daher verwendet man, um Schüttgüter schonend zu transportieren, sogenannte Schwingförderer. Hier wird die Förderfläche nur um wenige Millimeter hin und her geschüttelt. Die Schüttelbewegung wird dabei in die eine Richtung mit höherer Geschwindigkeit ausgeführt als in die entgegengesetzte Richtung, was den Transport der auf der Förderfläche liegenden Partikel bewirkt. So vorteilhaft der Schwingförderer im Hinblick auf Sauberkeit und Sicherheit ist, so schafft er aber unter Umständen ein neues Problem: Granulat aus verschiedenartigen Bestandteilen neigt dazu, sich beim Schütteln zu entmischen. Dieses Phänomen ist als ‚Paranuss-Effekt‘ bekannt geworden, weil man beobachtet hat, dass sich größere Nüsse beim Schütteln in einer Müsli-Tüte oben ansammeln. Ein solcher Entmischungsvorgang ist bei der industriellen Verpackung fast immer unerwünscht. In der pharmazeutischen Industrie wäre er sogar fatal, weil granulares Pulver ein wesentlicher Bestandteil von Tabletten ist und die im Pulver enthaltenen Wirkstoffe sich nicht separieren dürfen. Andernfalls wäre der Anteil der Wirkstoffe in äußerlich gleichen Tabletten unterschiedlich hoch.

Um Verfahrenstechnologien zu entwickeln, welche die Industrie bei der Lösung derartiger Probleme unterstützen, ist eine intensive Grundlagenforschung zur Dynamik von Schüttgütern erforderlich. Denn viele elementare Fragen, die das kollektive Verhalten dieser Partikel betreffen, sind bisher nicht oder nur unzureichend geklärt.

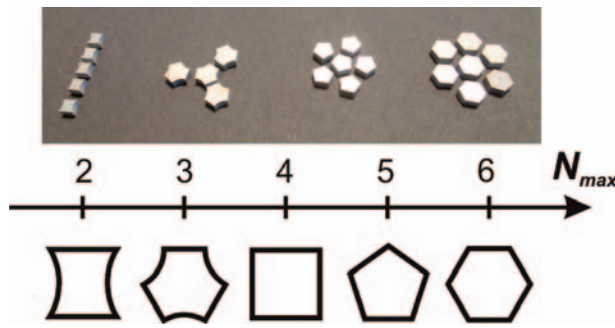
## DIGITALES DESIGN UND 3D-DRUCK GRANULARER MATERIE

Um die Grundlagen der Bewegung von Schüttgütern zu verstehen, finden an der Universität Bayreuth physikalische Experimente mit granularen Teilchen statt, die in ihrer Geometrie genau bekannt sein müssen. Für ein gegenwärtig in Pla-



Abb. 1: Leopold Kronecker war einer der bedeutendsten deutschen Mathematiker im 19. Jh. Er leistete grundlegende Beiträge insbesondere zur Algebra und Zahlentheorie. (Foto: public domain / Wikipedia.org).

Abb. 2: Fotos von geometrisch unterschiedlichen Plättchen, die als granulare Testkörper verwendet werden. Die Anzahl der Kontaktflächen zwischen Teilchen ist mit  $N_{max}$  bezeichnet. Die unteren Flächen zeigen jeweils die Geometrie, welche zur Steuerung des 3D-Druckers herangezogen wurde (Bild: Kai Huang).



nung befindliches Forschungsprojekt sind speziell geformte Teilchen vorbereitet worden. Wie immer die Teilchen sich berühren – ihre Kontaktflächen können dabei nur bestimmte Werte annehmen. Solche Partikel sind nicht im Handel erhältlich, aber die Digitalisierung kommt in Gestalt der 3D-Drucker zu Hilfe. Völlig neuartige Formen lassen sich am Computer ersinnen und dutzendweise in hoher Geschwindigkeit drucken.

So sind auch die in Abb. 2 gezeigten Plättchen entstanden. Konkave Formen haben die Aufgabe, die Benetzung durch Flüssigkeiten gezielt zu beeinflussen. Bei der experimentellen Untersuchung der kollektiven Bewegung solcher Teilchen geht es darum, die geometrischen Ursachen der Brückenbildung im Granulat zu verstehen. Es handelt sich dabei um ein Phänomen, das in der Industrie besonders gefürchtet ist, weil es beispielsweise in Getreidesilos zur Verstopfung führen kann.

### DIGITALE MESSTECHNIK

Um bei den Experimenten Daten mit der angestrebten Präzision erhalten zu können, ist digital gestützte Messtechnik erforderlich. Granulare Partikel kann man an Hand ihres Stoßverhaltens charakterisieren. Das einfachste Beispiel ist ein Fußball, der von einer Hauswand abprallt: Er kehrt dabei im Wesentlichen seine Bewegungsrichtung um, ist aber nach dem Stoß langsamer als vor dem Stoß. Das Verhältnis der zwei Geschwindigkeiten – der sogenannte Restitutionskoeffizient – ist eine wichtige charakteristische Größe für granulare Materie und wurde bereits von Newton eingeführt. Wie sie mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung berechnet wird, ist in Abb. 3 angedeutet. Ausgangspunkt sind dabei Filmaufnahmen einer Kugel, die an einer nassen Oberfläche reflektiert wird.

Experimentalphysiker an den Universitäten Erlangen-Nürnberg und Bayreuth haben Versuche dieser Art mehrere hunderttausend Mal mit einer einzelnen Kugel wiederholt, um Details des Stoßprozesses zu verstehen. Derartige Experimente sind nur aufgrund der Digitalisierung und der damit verbundenen Automatisierung möglich: Ein vom Messcomputer gesteuerter Roboter hebt die Kugel geduldig immer wieder an und lässt sie fallen.

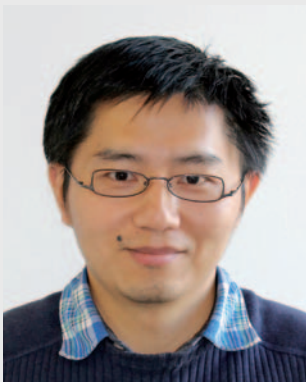
### DIGITALE AUSWERTUNG

Die beim Versuch entstandenen Filmaufnahmen der Kugel liegen im Computer digital vor. Sie sind hier als eine Zahlenkolonne dargestellt, die den Millionen Rasterpunkten des Bildes – also den einzelnen Pixeln – Farbwerte zuordnet. Diese befinden sich meistens auf einer Zahlenskala von 0 bis 255. Nun wird ein Computerprogramm benötigt, welches die Position der Kugel in jedem Einzelbild des Filmes findet – ein Standardproblem der digitalen Bildverarbeitung. Der Computer löst das Problem, indem er die Höhe des Kugelmittelpunktes als Funktion der Zeit behandelt. Mit der so extrahierten Information lässt sich das mathematische Modell für Wurfbewegungen an die Messdaten anpassen; aus dieser Anpassung gewinnt man schließlich den Restitutionskoeffizienten.

### AUTOREN



Prof. Dr. Ingo Rehberg ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik V und Sprecher des Profilfelds Nichtlineare Dynamik an der Universität Bayreuth.



PD Dr. Kai Huang ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Experimentalphysik V.

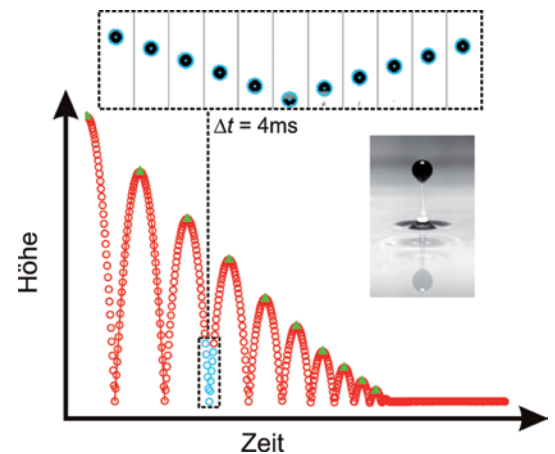
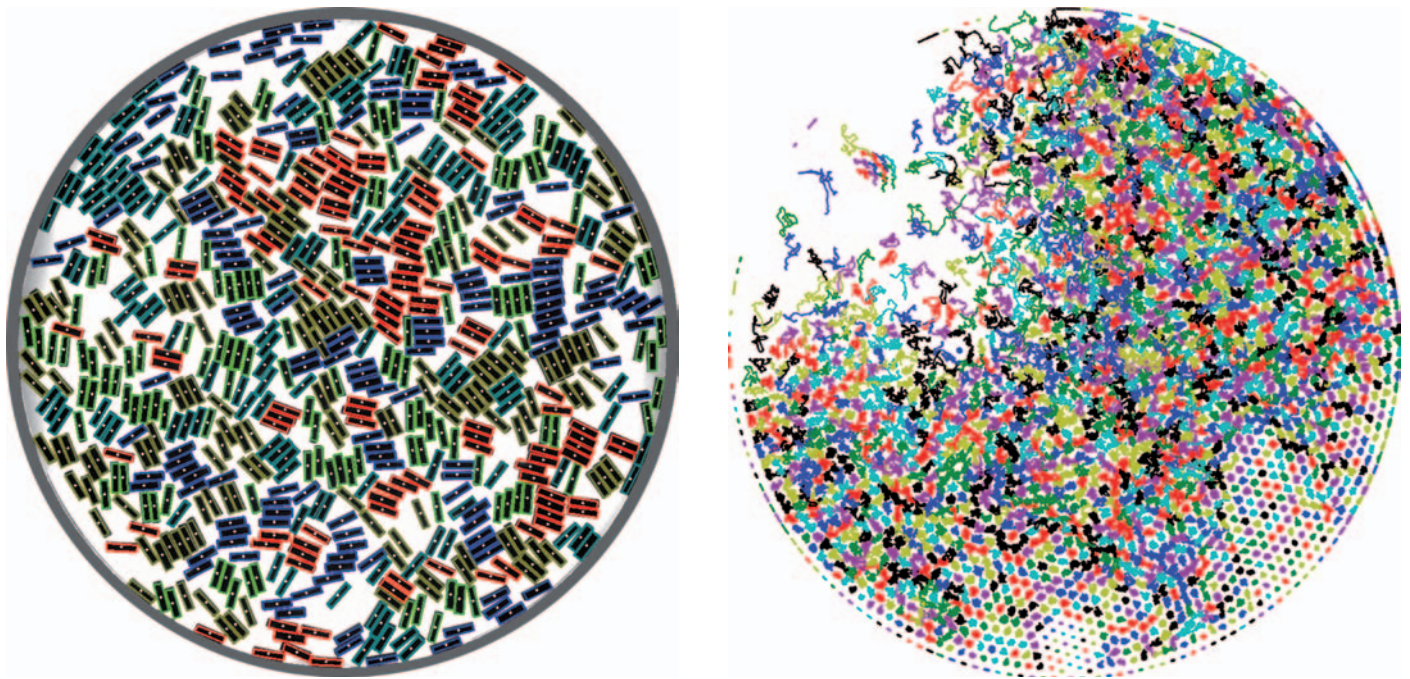


Abb. 3: Die rechts als Foto gezeigte schwarze Kugel traf kurz zuvor auf einen nassen Boden und wurde reflektiert. Der zeitliche Ablauf ist oben mit 11 Bildern im zeitlichen Abstand von 4 Tausendstel Sekunden dargestellt. Die aus den Bildern extrahierten Positionen des Kugelschwerpunktes sind in Rot als zeitlicher Verlauf aufgetragen (Bild: Kai Huang).



Die Position einer einzigen Kugel aufzuspüren, ist wohl das einfachste Teilchenfindungsproblem. Wenn ein Teilchen dagegen nicht rund ist, wird die Mustererkennung durch dessen unregelmäßige Drehbewegungen erschwert. Soll der Computer darüber hinaus nicht nur ein Teilchen, sondern viele Teilchen finden, die sich bei ihren Drehbewegungen auch noch berühren können, wird das Problem kompliziert. Die Abb. 4 zeigt ein Beispiel, bei dem es dennoch gelungen ist, alle Teilchen aufzufinden. Die Teilchen sind hier längliche Zylinder, die Digitalkamera nimmt deren Projektionen als stäbchenförmige Rechtecke wahr. Diese sind im Original schwarz, der farbige Rahmen wird vom Computer mithilfe der Kantenerkennung um die Teilchen herum gemalt. Die vom Computer gewählte Farbe korrespondiert mit der Richtung der Stäbchen. Wo der daraus berechnete Schwerpunkt des jeweiligen Teilchens liegt, wird durch den weißen Punkt angezeigt.

Führt man diese Analyse mehrere hundert Mal pro Sekunde aus, kann man damit die Wege und Geschwindigkeiten jedes einzelnen Teilchens darstellen und vermessen. Hier kommt aber eine zusätzliche Schwierigkeit ins Spiel: Neben dem Erkennen aller Teilchen in zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern müssen auch noch eindeutige Zuordnungen von einem Bild zum jeweils nächsten durchgeführt werden, um so den Weg jedes einzelnen Teilchens nachvollziehen zu können.

Abb. 5 zeigt die auf diese Weise identifizierten Bahnen kugelförmiger Teilchen. Das Bild lässt drei unterschiedliche Bereiche erkennen: Unten rechts gibt es eine regelmäßige Anordnung der Partikel, die nur kleine Bewegungen ausführen. Hier verhält sich das Granulat wie ein fester Körper. Im mittleren Bereich sind die Teilchen nicht geordnet, und ihre Beweglichkeit ist deutlich erhöht – wie in einer Flüssigkeit. Links oben ist die Teilchendichte gering, die Beweglichkeit dementsprechend sehr groß. Hier erinnert das Verhalten der Teilchen an Moleküle in einem Gas.

Im Prinzip könnte eine solche Messung von Teilchenbahnen auch ohne Rechenmaschinen durchgeführt werden. In den Kindertagen der Teilchenphysik wurde Ähnliches mit hilfreichen Heerscharen von „scanning girls“ tatsächlich getan. Doch Hunderte von Teilchen in Millionen von Bildern aufzuspüren, wäre auf diese Weise allerdings praktisch unmöglich. Eben diese Art von Messungen, wie sie erst durch die Digitalisierung realisierbar geworden sind, bilden die Grundlage für Forschungsergebnisse und innovative Verfahrenstechniken, die den industriellen Umgang mit Schüttgütern erleichtern.

Darüber hinaus möchten wir als Autoren auch ganz subjektiv feststellen, dass uns Experimentatoren das Programmieren ermüdungsfreier Maschinen als Alternative zu Routine-Auswertungen ungleich stärkeres Vergnügen bereitet!

Abb. 4 (links): Momentaufnahme von geschütteltem Granulat. Die Teilchen sind dabei als schwarze Rechtecke dargestellt. Die farbigen Rahmen zeigen die vom Messprogramm gefundenen Kanten, die weißen Punkte jeweils den daraus berechneten Schwerpunkt des Teilchens (Bild: Kai Huang).

Abb. 5 (rechts): Die Bahnen kugelförmiger Teilchen in einem geschüttelten kreisrunden Behälter. Die unterschiedlichen Farben der Bahnen dienen der besseren Unterscheidbarkeit (Bild: Kai Huang).