

**Experimentelle Untersuchung
formanisometrischer Granulate im Scherfluss
- Partikel im Split-Bottom-Schercontainer und im Silo**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)**

genehmigt durch die Fakultät für Naturwissenschaften
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von Dipl.-Phys. Sandra Wegner
geboren am 29.10.1986 in Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr. Ralf Stannarius
Prof. Dr. Thorsten Pöschel

eingereicht am: 29.08.2016
verteidigt am: 18.01.2017

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Symbole	v
1 Einleitung	1
1.1 Ausrichtung anisometrischer Partikel	2
1.2 Packungsdichte anisometrischer Partikel	4
1.3 Scherung in Granulaten	5
1.3.1 Einfluss der Scherung auf die Packungsdichte	7
1.3.2 Untersuchung der Ausrichtung anisometrischer Granulate unter Scherung	8
1.4 Silos	12
1.4.1 Ausflusststatistiken	12
1.4.2 Brückenbildung und Kraftketten	14
1.4.3 Dreidimensionale Studien	15
2 Versuchsaufbau und Durchführung	17
2.1 Messverfahren: Computertomografie	17
2.2 Scherexperimente	18
2.2.1 Ermittlung der Lage und Ausrichtung von Partikeln	19
2.2.2 Packungsdichtenbestimmung	21
2.2.3 Bestimmung des Zellenrotationswinkels bzw. der Scherverformung mit-	
tels Partikelverfolgung	22
2.2.4 Ermittlung der Granulatoberfläche	22
2.3 Siloexperimente	23
2.3.1 Bestimmung fließender Schichten	24
2.3.2 Ausrichtungsbestimmung der Teilchen	24
2.3.3 Packungsdichtebestimmung	24
2.3.4 Bestimmung der ersten Lage von Teilchen am verstopften Ausfluss . . .	25
2.3.5 Ermittlung der Anzahl der ersten Lage mit alternativen Methoden . . .	25
3 Ergebnisse	27
3.1 Scherexperimente	27
3.1.1 Ordnung und Ausrichtung oblater Granulate	27
3.1.2 Ordnung und Ausrichtung von Granulaten mit drei verschiedenen Haupt-	
achsen	37
3.1.3 Packungsdichten	46
3.1.4 Oberflächenmodulationen	56
3.2 Siloexperimente	58
3.2.1 Ausrichtung anisometrischer Granulate	58
3.2.2 Packungsdichten	69
3.2.3 Dom	76
4 Zusammenfassung und Ausblick	101

Literaturverzeichnis	107
A Anhang	117
A.1 Herleitung der Scherung aus der Scherrate	117
A.2 Umrechnung Drehwinkel des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle in Scherung	117
A.3 Größenbestimmung des biaxialen Ordnungsparameters D	118
A.4 Methode zur Bestimmung fließender Schichten im Silo	119
A.5 Ordnung und Orientierung im Silo für Dübel Q8, Q3, Q2 und Linsen	119
A.6 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Leistungen	122
A.7 Lebenslauf	123
Selbständigkeitserklärung	125
Danksagung	127

Verwendete Symbole

Bei Mehrfachvergabe ist an der jeweiligen Stelle die Bedeutung gekennzeichnet.

A	Fläche
D	Breite/Durchmesser Teilchen oder Aufbau
D	biaxialer Ordnungsparameter
H	Höhe Aufbau
N	Partikelanzahl
Q	Aspektverhältnis
R	Radius Teilchen oder Aufbau
S	Ordnungsparameter
T	Ordnungstensor
T	Abstand
a, b, c	Halbachsen Ellipsoid
d	Durchmesser Teilchen oder Aufbau
l	Länge Teilchen
m	Formparameter
r	Radius Teilchen oder Aufbau
s	Verschiebung oder Lawinengröße
u	Vektor entlang Teilchenachse
v	Geschwindigkeit
x, y, z	Raumachsen
α	Aspektverhältnis oder Drehwinkel
$\theta, \phi, \varphi, \beta, \vartheta$	Winkel zwischen Teilchenachse und bestimmter Ausrichtung
ρ	Dichte
σ	Standardabweichung
γ	Scherspannung oder Parameter
Φ	Packungsdichte
$Q8$	Dübel mit Aspektverhältnis $Q = 8$ (Verhältnis Länge zu Durchmesser)
$Q5$	Dübel mit $Q = 5$
$Q3$	Dübel mit $Q = 3, 3$
$Q2$	Dübel mit $Q = 2$
$Q3,5$	Glasstäbchen mit $Q = 3, 5$

1 Einleitung

Granulate sind Stoffe, die aus makroskopischen Festkörpern zusammengesetzt werden. Sie können jedoch auch Eigenschaften der anderen Aggregatzustände aufweisen. Fließen die Partikel eine Ebene [1,2] herunter oder durch einen Trichter bzw. aus einem Silo [3,4] verhalten sie sich wie Flüssigkeiten. Das eventuell auftretende Verstopfen eines Trichters oder Silos [5] kann nicht mehr mit den Eigenschaften einer Flüssigkeit erklärt werden, sondern nur durch das Verkeilen von Festkörpern. Außerdem können Granulate durch äußere Anregungen auch in einen gasartigen Zustand versetzt werden. Dies ist z.B. bei Planetenringen beobachtbar, aber auch im Labor erzeugbar [6–8].

Granulate treten in verschiedenen Größenordnungen auf, für Experimente werden meist kleine Mikro- bis Zentimeter große Teilchen verwendet. Des Weiteren liegen sie vollkommen symmetrisch, wie Kugeln, Zylinder oder Quader, oder in unregelmäßigen Formen, z.B. Sand oder Kies, vor.

Mit dieser Unterschiedlichkeit der Eigenschaften von Granulaten, unterschiedlichst geformt, groß bis klein, stehend über fließend bis fliegend, liegt eine Stoffklasse vor, die jeden Lebens- und Industriebereich betreffen kann. So sind genaue Studien ihres Verhaltens von stetigem Interesse.

In dieser Arbeit werden zwei Arten von Experimenten mit Granulaten durchgeführt. Zum einen wird es geschert, also die Teilchen gegeneinander bewegt. Es werden verschiedene Granulatformen, kugelförmig, länglich und abgeplattet, benutzt. Die Ausrichtung der Teilchen und die lokale Packungsdichte des Materials werden bestimmt. Dies ist einerseits nach langer Scherung im stationären Zustand, in dem sich Mittelwerte nicht mehr ändern und andererseits beim Einlaufen in diesen Zustand oder der Richtungsänderung der Scherung möglich. Hierzu werden Computertomografieaufnahmen der Materialien in einer Scherzelle angefertigt. Die einzelnen Partikel werden identifiziert und ihr Verhalten beschrieben. Die Packungsdichten der Granulate werden durch Mittelungen über bestimmte Bereiche in der Scherzelle ermittelt. Zum anderen wird der Ausfluss von verschiedenförmigen Granulaten, genauer gesagt, ihr Verstopfen eines Silos studiert. Dies ist eine häufig im täglichen Leben und in industriellen Anwendungen vorkommende Art eines Scherflusses. Hierbei wird ebenfalls die Ausrichtung der Partikel in Abhängigkeit des Orts im Silo und die Packungsdichte bestimmt. Außerdem wird die erste Lage von Teilchen am Ausfluss, der Dom, untersucht. Drei Untersuchungsmethoden finden Anwendung. Es werden erneut Tomografieaufnahmen betrachtet und für die Bestimmung des Doms können Fotos von unterhalb des Silos angefertigt werden. Außerdem wird versucht den Dom mittels Ansprühen der Teilchen mit Farbe zu bestimmen, vergleiche [9].

Zuerst werden bisherige Arbeiten zu den Themen vorgestellt. Hier wird auf die Ausrichtung von Partikeln und ihre Packungsdichten eingegangen. Des Weiteren werden bisherige Scherexperimente zu anisometrischen Granulaten vorgestellt. Zur Untersuchung von Silos werden Arbeiten zu den Themen Ausflusststatistiken, Brückenbildung beim Verstopfen und der Einfluss verschiedener Granulatformen vorgestellt.

Anschließend werden die Messmethoden erläutert. Im Weiteren werden die experimentellen Ergebnisse zu beiden Arten von Experimenten präsentiert und diskutiert.

1.1 Ausrichtung anisometrischer Partikel

Das Ausrichten anisometrischer Partikel kann z.B. unter Vibration [10–14], durch Luftströmung [15] oder beim Fließen des Granulats [16–19] erreicht werden.

Die Ausrichtung einer horizontalen Lage länglicher Stäbchen unter vertikaler Vibration wurde von Narayan et al. [12] untersucht. Drei verschiedene Partikelarten, Reis, Kupferzylinder und nudelholzartige Kupferstäbchen wurden zwischen zwei horizontalen, entweder runden oder quadratischen Begrenzungen, die vertikal nur geringen Spielraum von 0,2 mm erlauben, untersucht.

Ergebnisse dieser Experimente sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Je nachdem ob die Enden der Partikel verjüngt sind oder nicht, bilden sich bei unterschiedlichen Aspektverhältnissen ähnliche Zustände aus. Für Zylinder ergeben sich tetraedische Muster, d.h. eine vierfache kurzreichweitige Ordnung. Für die anderen beiden Teilchensorten ergeben sich flüssigkristallähnliche Zustände und Wirbel. Es wurde festgestellt, dass bei größerer Schüttelamplitude und geringerer Fläche das System ungeordneter wird. Die Verringerung der Ordnung mit größerer Amplitude legt eine Temperaturentsprechung nahe. Das Auftreten einer smektischen Phase bei Teilchen mit verjüngten Enden und einem Aspektverhältnis von fünf ist nicht vollständig geklärt, weil das System zu klein ist.

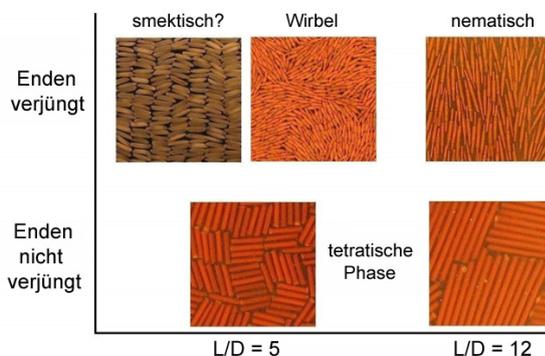


Abbildung 1.1: Ausrichtung von Stäbchen in einem Quasi-2D-Experiment. Vertikale Vibration einer horizontalen Lage. Erforschte Zustände in schematischer Übersicht des Phasenraums. Entnommen aus [12]. © SISSA Medialab Srl. Nachdruck mit freundlicher Genehmigung von IOP Publishing. Alle Rechte vorbehalten.

Das Ausrichten einer vertikalen Teilchenschicht unter vertikaler Vibration wurde von Ramaioli et al. [13] studiert. Die durchgeführten Simulationen beginnen mit einem horizontalen Gitter aus Sphärozyklern. Die Partikel liegen dabei mit ihrer längeren Achse parallel zum Boden in Reihen aufgestapelt. Nach einer Simulationszeit von 1200 s bei einer Frequenz von 12,5 Hz tritt eine überwiegend vertikale Ausrichtung der Teilchen auf. Nach einiger Zeit stellt sich ein Gleichgewichtszustand mit gleichbleibendem mittlerem Winkel ein. Es sind keine vertikalen Wände vorhanden, die diese Vorzugsrichtung vorgeben könnten. Eine Erklärung dieses Verhaltens kann durch das Betrachten der Lochgrößenverteilung erfolgen.

Hierzu werden die Lücken zwischen den Teilchen in zwei Klassen eingeteilt. Zum einen gibt es welche, die eine Länge zwischen Durchmesser und Länge der Partikel haben, zum anderen welche, deren Länge größer ist, als die der Teilchen. Die kleineren Löcher würden eine vertikale Ordnung hervorrufen, da vertikal ausgerichtete Teilchen in sie hineinfallen können und horizontale nicht. Bei der Untersuchung der Verteilung des Lochvolumens ergibt sich, dass 33 %

des Volumens zu kleinen und nur 15 % zu großen Lücken gehört. Das erklärt auch, warum Teilchen mit kleinerem Aspektverhältnis zu geringerer vertikaler Ordnung neigen.

Bei starker Vibration wird so viel Energie in das System eingebracht, dass eine zufällige Ordnung entsteht.

Ein weiteres Experiment, das die Ausrichtung unter Vibration zeigt, wurde von Ribière et al. [11] durchgeführt. Ein mit Reiskörnern befüllter Glaszylinder wird vertikal geschüttelt. Bei großen Schüttelintensitäten stellen sich zuerst zwei instabile Konvektionsrollen und letztendlich eine stabile Rolle im Granulat und eine schräge Oberfläche ein. Die Rolle kann durch die Verfolgung von Partikeln identifiziert werden. Die Partikel sind dabei teils entlang des Flusses der Rolle ausgerichtet.

Formanisometrische Granulate richten sich unter Fluss aus. Ehrentraut und Chrzanowska [17, 18] haben dies an der untersten Schicht herabrutschenden Reises auf einer schiefen Ebene beobachtet. Die Partikel drehen dabei nicht genau in Flussrichtung. Aus Fotos der untersten fließenden Schicht können die Verteilung der Ausrichtung und damit der mittlere Winkel analysiert werden. Die Teilchen nehmen im Mittel einen Winkel von ca. 30° zum Fluss ein.

Zur Erklärung des Phänomens wird das Prinzip minimaler Dissipation benutzt. Bei kleinerer Dissipation ergibt sich ein schnellerer Fluss. Die Partikel richten sich so aus, dass eine bestmögliche Bewegung vorliegt. Damit ist der Ordnungsparameter S durch die Dissipation beeinflusst. Hier ergibt sich bei $S = 0,5$ ein Minimum. Dies entspricht mit der Formel [17,20]

$$\cos(2\theta) = \frac{2 - 5S Q^{-1} - Q}{3S Q^{-1} + Q} \quad (1.1)$$

$Q = L/D$ - Aspektverhältnis der Partikel mit Länge L und Durchmesser D

einem Ausrichtungswinkel θ von 37° , der sich mit den experimentellen Daten deckt.

Außerdem wurde die Ausrichtung von Ellipsoiden im elastischen granularen Fluss von Campbell [21] mittels Soft-Particle-Simulationen untersucht. In Abhängigkeit des Aspektverhältnisses (1,25; 1,5; 2) ergeben sich Ausrichtungswinkel von 39° , 34° und 27° . Sie sinken mit steigendem Aspektverhältnis.

Die Ausrichtung und Packung kohäsiver anisometrischer Teilchen wurde von Hidalgo et al. [22] mittels DEM (Discrete Element Method) unter Gravitation untersucht. Geordnete Strukturen und die Ausrichtung von Teilchen werden weniger ausgeprägt, je größer die eingeführten Kohäsionskräfte werden.

Ein weiteres Betätigungsfeld, in dem die Ausrichtung von Granulat häufig herangezogen wird, ist die Geologie. Die Lage von Gesteinen kann z.B. Auskunft über die ursprüngliche Flussrichtung vulkanischen Gesteins liefern. Mittels der fotostatistischen Methode von Karátson et al. [23] wird die Orientierung von Bruchstücken in vulkanoklastischen Ablagerungen untersucht. Hierzu wird ein Foto eines Gesteinsschnitts angefertigt und durch die Orientierungen der enthaltenen Bruchstücke auf die Flussrichtung geschlossen.

1.2 Packungsdichte anisometrischer Partikel

Packungsdichten von Ellipsoiden und formanisometrischen Partikeln wurden unter anderem von [24–31] beschrieben.

Zuerst wird hier auf die Arbeit von Delaney et al. [28] eingegangen. Darin wurden Packungsdichten anisometrischer Partikel, Superellipsoide, die durch

$$\left(\frac{x}{a}\right)^m + \left(\frac{y}{b}\right)^m + \left(\frac{z}{c}\right)^m = 1, \quad (1.2)$$

mit m als Formparameter und a , b und c als Halbachsen, definiert sind, simuliert. Mittels DEM werden zufällig ausgerichtete Teilchen in einem Volumen mit periodischen Rändern an zufälligen Orten platziert. Dies geschieht bei geringer Packungsdichte ($\Phi < 0,2$). Die Teilchen wachsen dann mit konstanter Wachstumsrate bis der Überlapp der Partikel divergiert und das System verklemt. Beispielhaft sind einige Teilchen in Abbildung 1.2 (a) dargestellt.

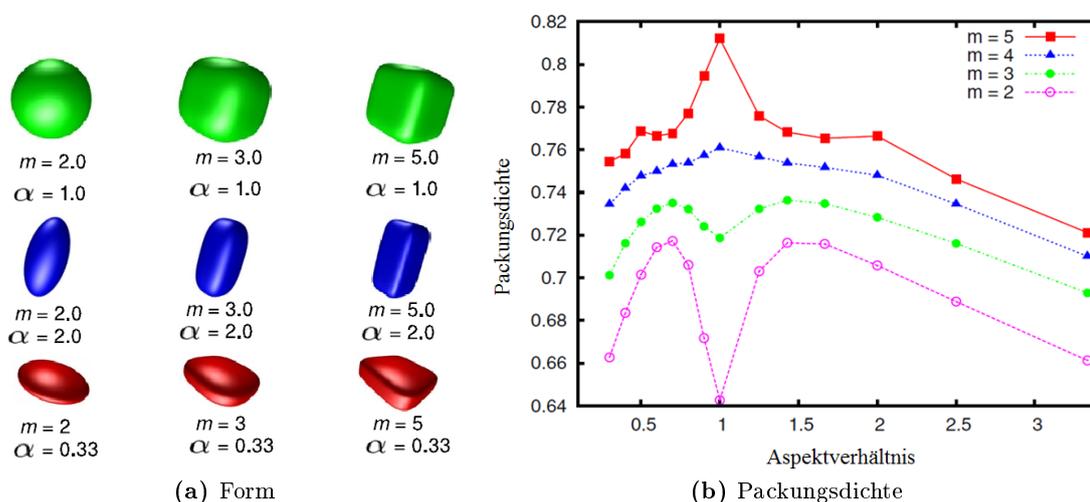


Abbildung 1.2: (a) Form von Superellipsoiden, definiert durch $\left(\frac{x}{a}\right)^m + \left(\frac{y}{b}\right)^m + \left(\frac{z}{c}\right)^m = 1$, a , b , c - Halbachsen, in Abhängigkeit der Parameter m (Formparameter) und α (Aspektverhältnis), mit Hauptachsen $a = 1$, $b = 1$ und $c = \alpha$ (b) Packungsdichte von Superellipsoiden in Abhängigkeit von m und α berechnet für kleine Wachstumsraten beim Vergrößern der Teilchen. Entnommen mit Genehmigung aus [28].

Bei kleinen Wachstumsraten entstehen die dichtest gepackten Anordnungen, so dass für den in Abbildung 1.2 (b) gezeigten Verlauf der Packungsdichte in Abhängigkeit der Formparameter, diese verwendet wurden. Teilchen mit größerer Eckigkeit, also mit höherem Formparameter m , zeigen eine höhere Ordnung und damit eine größere Packungsdichte. Dies kann z.B. beim Aspektverhältnis $\alpha = 1$ sehr gut erklärt werden. Kugeln ($m = 2$) packen schlechter als annähernde Würfel ($m = 5$). Die Ergebnisse für $m = 2$ können auch ähnlich der Arbeit von Man et al. [32], über Simulationen prolater und oblater Ellipsoide, entnommen werden.

Die Packungsdichte von Zylindern wurde von verschiedenen Gruppen untersucht. Zou et al. [33] untersuchten lose und dichte Zufallspackungen zylindrischer Teilchen. Es wurden Zylinder des Durchmessers 2,62 mm in einem zylindrischen Container des Durchmessers 19,7 cm bzw. 26 cm betrachtet. Jedes Experiment wird dreimal durchgeführt und anschließend

gemittelt. Randeinflüsse können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1.3 dargestellt.

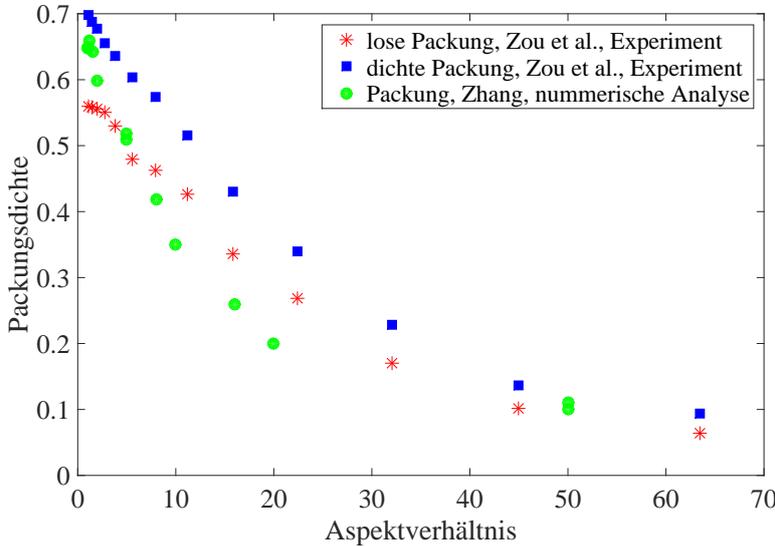


Abbildung 1.3: Abhängigkeit der Packungsdichte vom Aspektverhältnis für Zylinder, nach Daten von [33, 34]

te unter 0,2.

Zuletzt werden hier noch die Dichten für Kugeln angegeben. Es wird zwischen der dichtesten Packung Φ_{cp} und der dichtesten Zufallspackung (random close packing) Φ_{rcp} , der maximalen Dichte, die ein zufällig gepacktes System haben kann [37], unterschieden. Es ergibt sich $\Phi_{cp} = \frac{\pi}{\sqrt{18}} = 0,7405$ [37] aus der kubisch-flächenzentrierten Packung und $\Phi_{rcp} \approx 0,637$ [38].

1.3 Scherung in Granulaten

Um langsam gescherte Granulate zu untersuchen, werden häufig Couette- oder Split-Bottom-Zellen verwendet [39–45]. Couettezellen sind Aufbauten, in denen sich ein kleiner Zylinder in einem großen dreht. Dadurch wird das Material in der Nähe des sich drehenden Zylinders mitgenommen. Die dünne Scherzone zwischen bewegtem und stehendem Granulat ist meist etwa fünf bis zehn Partikeldurchmesser breit und unabhängig von der Drehgeschwindigkeit und Einzelheiten der Zelle [40, 41]. Bei Split-Bottom-Geometrien liegt ein geteilter Boden innerhalb des Versuchsaufbaus vor, wie in Abbildung 1.4 zu erkennen ist. Die Teilchen liegen hier auf verschiedenen Flächen, von denen sie mitbewegt werden, so dass dann eine breitere Scherzone, die nicht am Rand verankert ist, zwischen dem bewegten und stehenden Material entsteht [41].

Bei diesen langsamen Bewegungen wird der Impuls größtenteils durch dauerhaften Kontakt der Teilchen übertragen. Bei schnellen Bewegungen, wie z.B. Lawinen, wird der Kontakt ebenfalls durch längere Kontakte der Teilchen, aber auch durch Stöße, übertragen.

Scherzonengeometrien wurden unter anderem von Unger et al. [46] mittels Mohr-Coulomb-

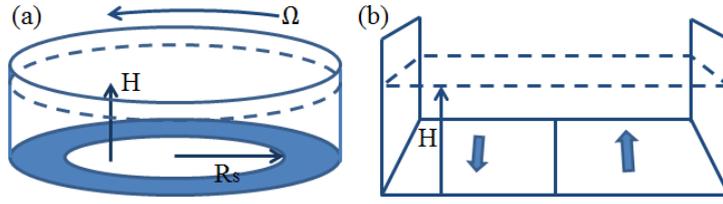


Abbildung 1.4: Verschiedene Split-Bottom-Geometrien (a) zylindrischer Aufbau, im Inneren ist eine Scheibe des Radius R_s , hier: der äußere Zylinder wird gedreht; auch üblich: Scheibe wird gedreht, äußerer Zylinder starr (b) linearer Aufbau, der Boden ist gespalten, einzelne Seiten gegeneinander verschiebbar, kann gesehen werden als: $R_s \rightarrow \infty$. Abbildung skizziert nach [41].

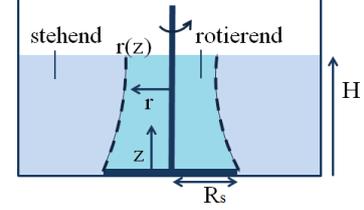


Abbildung 1.5: Schematische Scherzone $r(z)$ der Breite Null, trennt den inneren rotierenden Zylinder und den äußeren statischen. Abbildung skizziert nach [41].

Theorie beschrieben. Hierzu wird die Energiedissipation minimiert. Es ergeben sich Scherzonen verschwindender Breite. Die Gesamtreibung entlang der gescherten Zone $r(z)$, vergleiche Abbildung 1.5, ergibt das Minimum des Funktionals:

$$T(H) = 2g\pi\rho\Phi\mu \int_0^H (H-z)r^2\sqrt{1+(dr/dz)^2}dz \quad (1.3)$$

ρ - Dichte des Materials im festen Material
 Φ - durchschnittliche Packungsdichte ($\sim 0,59$)

Hierbei werden ein konstanter Reibungskoeffizient μ und der Druck P angenommen. $r(z)$ wird als Mitte der Scherzone definiert. Für oberflächennahe Scherzonen liegt eine gute Übereinstimmung mit Experimenten vor. Für tiefe Scherzonen kann sich eine Kuppelform ergeben. Mit steigender Füllhöhe sinkt die Kuppelhöhe auf Grund des erhöhten Drucks.

Mit diesem Modell können einige Aspekte von Scherzonen richtig beschrieben werden. Es zeigt jedoch auch Defizite, wie die verschwindende Scherzonenbreite.

Das Profil der Scherzone wurde von Unger et al. [46] folgendermaßen an experimentelle Daten gefittet:

$$h = H - r \left[1 - \frac{R_S}{r} [1 - (H/R_S)^\alpha] \right]^{1/\alpha} \quad (1.4)$$

h - Höhe
 H - Füllhöhe der Scherzelle
 R_S - Radius der rotierenden Scheibe
 α - Fitparameter: 2, 5 gesetzt

Weite Scherzonen wurden von Unger et al. und von Jagla [47, 48] beschrieben. Bei [47] wird ein zufälliges bzw. ein sich zufällig veränderndes lokales Potential mit einbezogen. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden in [48] mittels den Resultaten aus einem zweidimensionalen Modell mit stochastischen Kräften zwischen den Partikeln, bestätigt. Hier wurde eine längliche Split-Bottom-Zelle untersucht und die linke und rechte Hälfte dabei mit sehr kleinen Geschwindigkeiten $v, -v$ verschoben. Die Breite der Scherzone skaliert dann mit H^β mit einem theoretisch ermittelten $\beta = 0,68 \pm 0,02$.

1.3.1 Einfluss der Scherung auf die Packungsdichte

Erstmals wurde der Effekt von Scherung auf fließende Granulate von Reynolds [49] beschrieben. Hierbei kommt es zu einer Packungsdichteverringering, die heute als Reynoldsdilatanz bezeichnet wird. Dicht gepackte Granulate können Reibung reduzieren wenn einzelne Partikel gegeneinander verschobene werden. Dabei wird das eingenommene Volumen vergrößert.

Auswirkungen von Scherung auf die Packungsdichte isotropen Materials, genauer Mohnsamen mit Durchmesser 1 mm, wurde von Sakaie et al. [43] studiert. Das Material wurde in einer zylindrischen Scherzelle mit beweglicher innerer Bodenplatte des Radius R_s mit Füllhöhe H untersucht. Die Packungsdichten werden mittels MRI (Magnetic Resonance Imaging), einem bildgebenden Verfahren zur Darstellung innerer Strukturen, studiert. Hierbei reicht die Auflösung nicht zur Erfassung einzelner Körner, aber relative Dichteunterschiede $\Delta\Phi = \Phi(t)/\Phi(0) - 1$ sind erkennbar.

Für die hier gezeigten geringen Füllhöhen (bis $H/R_s \approx 0.6$), vergleiche Abbildung 1.6, wird das Granulat auf der inneren Scheibe mitbewegt. Zwischen diesem und dem äußeren Material entsteht eine Scherzone, in der die Packungsdichte abnimmt. Die Scher- und Dilatationszone sind nicht völlig identisch. Die Dichte fällt hier um 10 bis 15 %. Die Packungsdichten variieren von 55 %, was einer losen Zufallspackung gleichkommt, bis zu 64 %, was der dichtesten Zufallspackung entspricht.

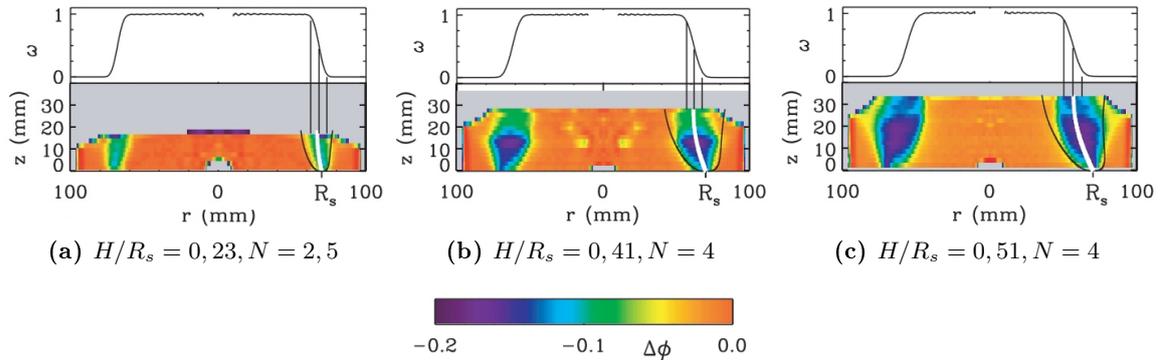


Abbildung 1.6: Vergleich der Oberflächenflussfelder ω und Änderungen der Packungsdichten nach N Rotationen mit jeweiligem Füllhöhen-Radius-Verhältnis. Die weißen Kurven stellen den theoretischen Verlauf der Mitte der Scherzone nach Formel 1.4 dar. Die schwarzen Kurven geben die Kanten der Scherzone an. Die Farbcodierung zeigt die relativen Packungsdichteänderungen $\Delta\Phi = \Phi(t)/\Phi(0) - 1$. Entnommen mit Genehmigung aus [43].

Packungsdichteänderungen wurden für längliche Teilchen, Dübel, von Wegner et al. [50, 51] untersucht. Hier kommt es trotz Ausrichtung der Teilchen zu einem Abfall der Packungsdichte in der Dilatationszone. Für größer werdende Aspectverhältnisse Q wird dieser Abfall jedoch geringer. Bei $Q = 2$ liegt er noch bei ca. 13 % und bei $Q = 5$ nur noch bei ca. 5 %. Dies kann mit den gegenläufigen Mechanismen Dilatanz durch Scherung und Packungsdichtevergrößerung durch erhöhte Nahordnung erklärt werden.

Außerdem wurden glatte monodisperse Kugeln untersucht. Für diese ergibt sich ein kristallines Gitter aus Partikeln in der Scherzone. Der Effekt wird in dieser Arbeit näher untersucht werden.

Kristallisation harter Kugeln unter Scherung wurde von Daniels und Behringer [52, 53], von Tsai et al. [54, 55] und von Panaitescu et al. [56] beobachtet. Letztere Veröffentlichung zeigt, dass im Material einer Scherzelle eine homogene und an den Wänden eine inhomogene Kristallisation stattfindet. Die Nukleationskeime im Inneren bestehen dabei aus 10 bis 60 Kugeln mit hexagonal dichtester Packung. Diese ist hauptsächlich entlang der Scherrichtung ausgerichtet. Mit steigender Packungsdichte tritt eine steigende Anzahl von kubisch-flächenzentrierten Kristalliten auf.

1.3.2 Untersuchung der Ausrichtung anisometrischer Granulate unter Scherung

Das Verhalten länglicher Partikel wurde unter Scherung von Börzsönyi et al. [57, 58] und Wegner et al. [50, 51] in zylindrischen Split-Bottom-Zellen untersucht. Mit drei experimentellen Methoden, Computertomografie, Videoaufnahmen von oben und Drehmomentmessungen der rotierenden Scheibe, wurden die verwendeten Granulate, Reis ($Q = L/D = 2; 3, 4; 4, 5$), Glasstäbchen ($Q = 3, 5$) und Dübel ($Q = 2; 3, 3; 5$), studiert. Außerdem wurden DEM-Simulationen angefertigt.

Die betrachtete Ordnung wird über den spurlosen Ordnungstensor ermittelt. Dieser wird häufig zur Beschreibung von Flüssigkristallen genutzt [59, 60]. Dabei werden rotationssymmetrische Ellipsoide, zur Teilchenachsendefinition, vorausgesetzt.

$$T_{ij} = \frac{3}{2N} \sum_{n=1}^N \left(u_i^{(n)} u_j^{(n)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \quad (1.5)$$

N - Gesamtteilchenzahl

u - Einheitsvektor entlang Teilchenachse

δ - Kronecker-Delta

Der betragsmäßig größte Eigenwert von \mathbf{T} ist der Ordnungsparameter S . Er kann Werte von -0,5 bis 1 annehmen und beschreibt wie sich die lange Achse der Teilchen in Bezug auf die Vorzugsausrichtung verhält. Der biaxiale Ordnungsparameter D ergibt sich aus der Differenz der anderen beiden Eigenwerte. Er beschreibt, wie die lange Achse der Teilchen in Bezug auf die anderen Achsen des Laborsystems liegt. Die Ausrichtung der Teilchen wird durch θ_{av} , den Winkel zwischen Scherrichtung und mittlerer Partikelausrichtung, beschrieben. Dieser kann z.B. aus der Abweichung des Eigenvektors des größten Eigenwerts zur Scherrichtung ermittelt werden.

Dieser Tensor stellt eine vereinfachte Form für rotationssymmetrische Ellipsoide dar. Für feste Moleküle beliebiger Form wird zur Ermittlung der Ordnung ein Tensor vierter Stufe [60, 61] S_{ij}^{AB} verwendet.

$$S_{ij}^{AB} = \frac{3}{2N} \sum_{n=1}^N \left(u_{iA} u_{jB} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{AB} \right) \quad (1.6)$$

u - Einheitsvektor entlang Teilchenachse

$A, B = x, y, z$ - Indizes bezüglich des Laborsystems

$i, j = a, b, c$ - Indizes der orthogonalen Einheitsvektoren des Moleküls

δ - Kronecker-Delta

Der Ordnungsparameter $S = S_{cc}^{ZZ}$ und der biaxiale Ordnungsparameter $D = S_{cc}^{YY} - S_{cc}^{XX}$ können auch mit diesem Tensor ermittelt werden. Des Weiteren werde zwei zusätzliche Ordnungsparameter eingeführt, die für die Beschreibung von Teilchen mit drei unterschiedlichen Achsen verwendet werden. Die Phasen-Biaxialität (engl. phase biaxiality) $D' = S_{aa}^{ZZ} - S_{bb}^{ZZ}$ entspricht der Ordnung der kurzen Teilchenachsen a und b in Bezug auf den Direktor. Der Ordnungsparameter $D'' = (S_{aa}^{XX} - S_{aa}^{YY}) - (S_{bb}^{XX} - S_{bb}^{YY})$ entspricht der Differenz der Phasen-Biaxialität der a- und b-Teilchenachsen. Die vier Parameter streben für hohe Ordnung gegen die folgenden Werte $S \rightarrow 1$, $D \rightarrow 0$, $D' \rightarrow 0$, $D'' \rightarrow 3$. [61]

In den DEM-Simulationen der Granulate werden die länglichen Teilchen aus überlappenden Kugeln zusammengesetzt. So wurden 600 bis 1200 Teilchen zwischen zwei parallelen, rauen Wänden unter konstantem Druck untersucht [57].

Experimentell wurde herausgefunden, dass sowohl S als auch θ_{av} in weiten Bereichen unabhängig von der Scherrate sind [57]. Die Ausrichtung der Teilchen und ihr Ordnungsparameter wurden zu den in Abbildung 1.7 angegebenen Werten bestimmt.

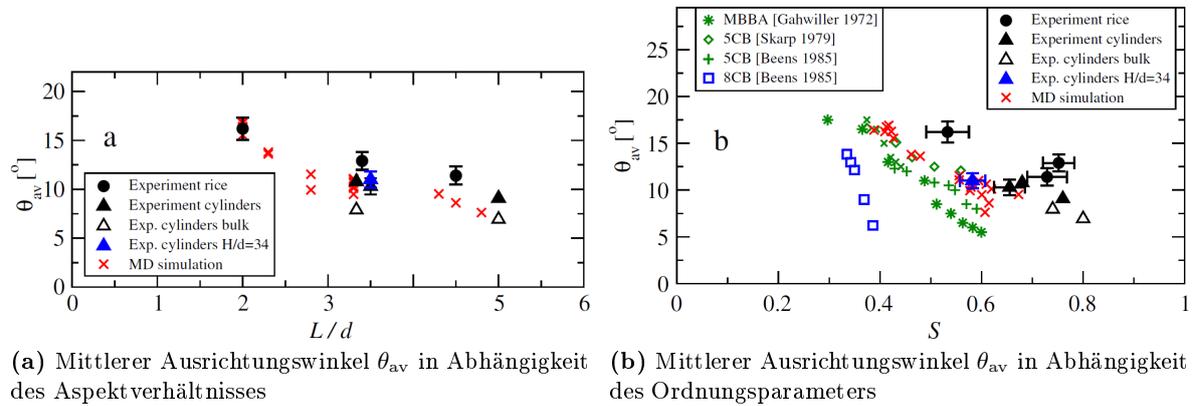


Abbildung 1.7: Mittlerer Ausrichtungswinkel θ_{av} in Abhängigkeit verschiedener Größen für Granulate im Vergleich zu Flüssigkristallen. Entnommen mit Genehmigung aus [57]. Copyright (2012) von der American Physical Society.

Die Verteilung der Ausrichtung von Stäbchen im Scherfluss ist in Abbildung 1.8 dargestellt. Die Grafen zeigen, dass mit steigendem Aspektverhältnis die Verteilungen schmaler werden, also die Ordnung erhöht wird. Der mittlere Winkel sinkt mit steigendem Aspektverhältnis. Eine Besonderheit ergibt sich für sehr kurze Stäbchen, wie leicht für Dübel mit Aspektverhältnis 2 angedeutet und deutlich für Glasstäbchen mit Aspektverhältnis 1,4 zu sehen ist. Sie nehmen unter Scherung zwei Vorzugsausrichtungen ein.

Des Weiteren wurde der Ordnungsparameter und die Orientierung in der Horizontalen, sowie die Verteilung dieses Winkels für das Einlaufen in den stationären Zustand aus zwei Anfangsbedingungen betrachtet. Zum einen beginnt die Scherung im unausgerichteten, frisch eingefüllten Zustand, zum anderen findet eine Umkehr der Rotation des Inneren der Scherzelle statt. Dies ist in den Abbildungen 1.9 und 1.10 zu sehen. Für das Einlaufen aus dem frisch eingefüllten Zustand bildet sich die Ordnung für die längeren Dübel schnell heraus und der Ausrichtungswinkel fällt auf einen konstanten Wert ab. Nachdem die Teilchen drei bis vier Nachbarpartikel passiert haben, hat sich ein stationärer Zustand eingestellt. Dabei drehen sich die meisten Teilchen auf Grund des Scherflusses in die gleiche Richtung. Bei der Rotationsumkehr fällt der Ordnungsparameter zunächst, und steigt dann erneut auf den stationären Wert an. Der

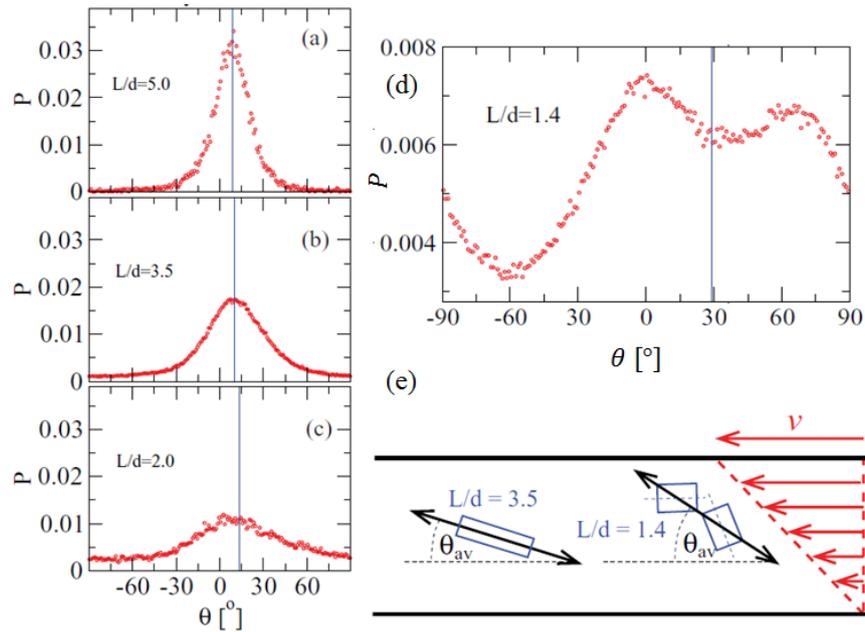


Abbildung 1.8: (a-c) Verteilung des Ausrichtungswinkels θ für Dübel mit Aspektverhältnissen 5, 3,5 und 2. Die Daten wurden mittel CT-Experimenten gewonnen. (d) Verteilung des Ausrichtungswinkels θ für kurze Glasstäbchen mit Aspektverhältnis 1,4. Die Daten wurden optisch durch filmen des Scherzelle von oben erhoben. Die vertikale blaue Linie gibt die Durchschnittsorientierung an. (e) Typische Ausrichtung für längere und kürzere Zylinder. Entnommen mit Genehmigung aus [58]. Copyright (2012) von der American Physical Society.

Großteil der Teilchen dreht sich dabei zurück und ein kleiner Anteil dreht sich über einen weiten Winkelbereich (über 90°) weiter. Die Scherung, die bis zum stationären Zustand nötig ist, ist für beide Einlaufvorgänge etwa gleich.

Außerdem wurde das Drehmoment der rotierenden Platte der Scherzelle beim Drehen aus dem ungeordneten Zustand bestimmt. Dabei fällt das Moment schneller als die Ausrichtung auf einen konstanten Wert ab.

Gou et al. [62] modellierten ebenfalls längliche Teilchen, zum einen mittels überlappenden Kugeln, zum anderen als Zylinder. In diesen DEM-Simulationen wurde herausgefunden, dass im Bereich, in dem das Verhalten durch Stöße dominiert ist, einem sehr dichten Regime, Spannungen mit sinkendem Aspektverhältnis und wachsender Holprigkeit der Oberfläche steigen. Neben länglichen Partikeln wurden auch abgeplattete mittels DEM untersucht. [63]. Dabei wurde ebenfalls herausgefunden, dass je länger oder platter die Teilchen werden, die Ausrichtung ausgeprägter auftritt. Durch diese Ausrichtung am Fluss werden die Wechselwirkungen zwischen Teilchen und ihren Nachbarn minimiert und dadurch die Spannung und Reibung verringert.

Scheibenförmige Partikel mit quadratischer Fläche wurden von Boton et al. [64] mittels DEM-Simulationen in drei Dimensionen untersucht. Die Plättchen werden durch abgerundete Polyeder angenähert. Einige Ergebnisse dieser Arbeit sind, dass der Scherwiderstand mit zunehmendem Aspektverhältnis wächst, wenn die Teilchen entlang einer zum Scherfluss senkrechten Richtung ausgerichtet sind und dass der Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Aspektverhältnis nicht monoton zu- bzw. abnimmt. Außerdem wurde gezeigt, dass je flacher

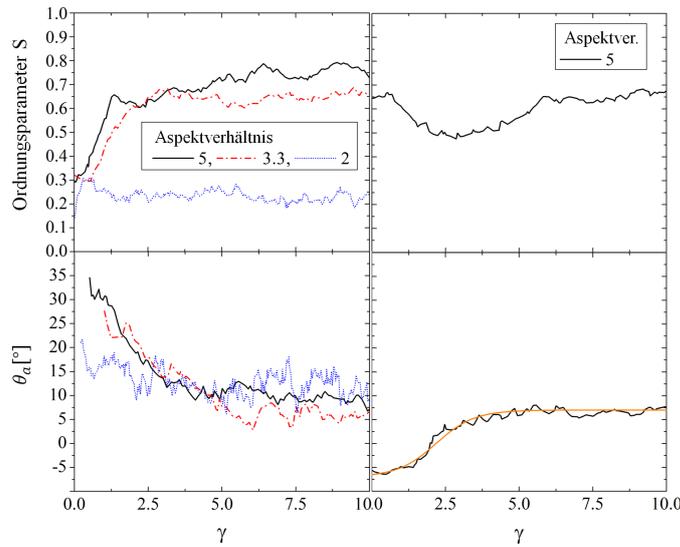


Abbildung 1.9: Entwicklung des Ordnungsparameters S und des Winkels in der horizontalen Ebene θ in Abhängigkeit der Scherspannung, beginnend bei zufälliger Ausrichtung der Partikel (links) und nach Rotationsumkehr (rechts) für Dübel der angegebenen Aspektverhältnisse. Die glatte orange Linie im Winkelverlauf rechts repräsentiert eine Näherung der Direktor-Reorientierung von Flüssigkristallen übertragen auf das Granulatverhalten. Entnommen aus [50]. Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry.

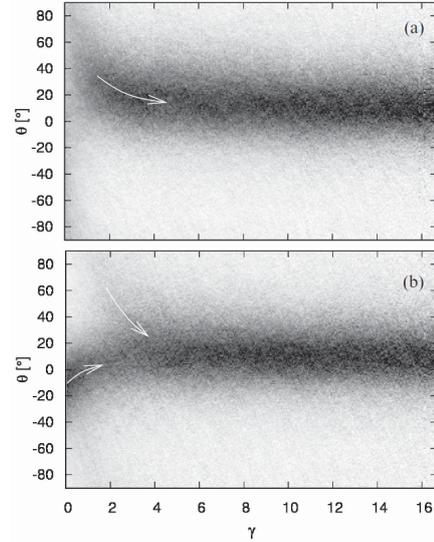


Abbildung 1.10: Entwicklung der Verteilung des Ausrichtungswinkels θ in Abhängigkeit der Scherspannung, beginnend (a) bei zufälliger Ausrichtung der Partikel und (b) nach Rotationsumkehr. Mit Glasstäbchen des Aspektverhältnisses 3,5 mittels Beobachtung von oben erstellt. Weiße Pfeile zeigen Zentren der Verteilung. Für (b) scheint es zwei unabhängig relaxierende Verteilungen zu geben. Entnommen mit Genehmigung aus [58]. Copyright (2012) von der American Physical Society.

die Teilchen werden, desto mehr Teilchen drehen sich unter Scherung in eine bevorzugte Richtung. Dabei richten sich die Teilchen am Geschwindigkeitsfeld aus.

Mittels molekularer Dynamik wurde das Verhalten zweidimensionaler Teilchen von Peña et al. [65] studiert. Hierzu wurde eine periodische Scherzelle simuliert. Die Teilchen können mit verschiedenen Anfangsausrichtungen geschert werden. Die sich ergebenden Endzustände zeigen sehr ähnliche Ausrichtungen der Teilchen gegenüber der Scherrichtung, wie in anderen aufgeführten Publikationen.

Verschieden geformte Teilchen wurden ebenfalls in zwei Dimensionen von Saint-Cyr et al. [66] und Azéma et al. [67, 68] unter Scherung betrachtet. Die Rotation von zwei-dimensionalen länglichen Ellipsoiden unter Scherung wurde unter anderem von Masoud et al. [69] und Farhadi et al. [45] studiert. In letzterer Publikation wird das Verhalten mittels fotoelastischer runder und länglicher Scheiben untersucht. Dabei stellt sich heraus, dass sich das Verhalten der beiden Teilchenarten bei Langzeit-Rheologie-Experimenten deutlich unterscheidet. Die Scherung U-förmiger Partikel wurde von Marschall et al. [70] untersucht. Die weichen zweidimensionalen Teilchen sind reibungslos und werden mittels Simulationen studiert. Es treten verschiedene Ordnungszustände auf. Eine zusammenfassende Arbeit zu Experimenten und Simulationen anisometrischer Granulate wurde von Börzsönyi und Stannarius [71] veröffentlicht.

1.4 Silos

Die Erforschung des Ausflusses durch Verengungen wird seit Jahren vorangetrieben. Damit kann nicht nur das Verhalten von kleinen Partikeln in Silos oder Röhren [72, 73], wie häufig in der Industrie vorkommend, sondern auch von anderen für den Menschen relevanten Phänomenen erklärt werden. Verkehrs- und Fußgängerverhalten [74], insbesondere Staus [75, 76], die schnelle Evakuierung vieler Menschen und damit verbundener Paniken [77] oder Herdenverhalten von Nutztieren beim Treiben in einen Stall [78] stellen Situationen vieler gleichartiger Individuen, die eine Verengung passieren müssen, dar.

Um Granulate und ihr Verhalten in Silos zu charakterisieren, können verschiedene Sachverhalte experimentell [79, 80] und mittels Simulationen [81, 82] studiert werden. Zum einen kann der Ausfluss von Granulat aus einem Silo, z.B. mittels Ausflussstatistiken, also welche Bereiche fließen bei welcher Granulatform [83–86], wann kommt es zu Verstopfungen [4, 87, 88] und wie verhält sich das System davor [89], beschrieben werden. Dabei interessiert unter anderem wie Verstopfungen gelöst werden können [90–94] und mit welcher Geschwindigkeit das Granulat ausfließt [95]. Zum anderen ist es möglich Brücken und Kraftketten an der Öffnung des Silos zu beschreiben [5, 96–100]. Solche Studien wurden bisher häufig, vor allem zur Veranschaulichung der Brückenbildung, in zwei Dimensionen, teils auch dreidimensional [101–103] durchgeführt. Der Einfluss der Granulatform und einer damit verbundenen Ausrichtung im Scherfluss auf die Spannungsverteilung und -ausbreitung wurde von Kanzaki et al. [104] untersucht. Einige Veröffentlichungen zu den genannten Themen werden hier im Folgenden kurz vorgestellt.

1.4.1 Ausflussstatistiken

Der Ausfluss und das Verstopfen verschiedener Materialien, wie Glaskugeln, Nudeln, Linsen und Reis, aus bzw. in einem dreidimensionalen Silo wurde von Zuriguel et al. [4] untersucht. Aus einem zylinderförmigen Silo mit rundem Loch im Boden, vergleiche Abbildung 1.11 (A), fließen Partikel bis zum Verstopfen durch Brückenbildung. Die ausgeflossene Granulatmenge kann mittels Waage gemessen werden. Ein erneuter Fluss wird durch einen Luftstoß, der die Teilchenbrücke bricht, realisiert. Damit können Statistiken erstellt werden, wie viele Teilchen für ein bestimmtes Material zwischen zwei Verstopfungen in Abhängigkeit der Öffnung im Boden ausfließen. Die mittlere Lawinengröße $\langle s \rangle$ in Abhängigkeit einer dimensionslosen Lochgröße $R = R_{\text{Loch}}/r_{\text{Teilchen}}$ ist für Glaskugeln in Abbildung 1.11 (B) dargestellt. Diese Daten können durch ein Potenzgesetz der Form,

$$\langle s \rangle = \frac{A}{(R_c - R)^\gamma} \quad (1.7)$$

mit dem kritischen Radius R_c , ab dem keine Verstopfung mehr auftritt, beschrieben werden. Wenn R erhöht wird, sinkt die Verstopfungswahrscheinlichkeit. Ab dem kritischen Radius traten keine Blockierungen mehr auf.

Außerdem wurde entdeckt, dass Materialeigenschaften, wie Dichte oder Reibungskoeffizient, das Ausflussverhalten nicht verändern. Unterschiedlich geformte Partikel rufen jedoch verschiedene Ausflüsse hervor. Hier ändert sich der kritische Radius, aber der Exponent γ bleibt annähernd gleich.

Neuere Untersuchungen und Neuinterpretationen von Daten von Thomas und Durian [105, 106] deuten darauf hin, dass die mittlere Lawinengröße besser durch ein exponentielles Gesetz beschrieben wird. Dadurch entfällt der kritische Radius und das Verstopfen eines Silos ist bei

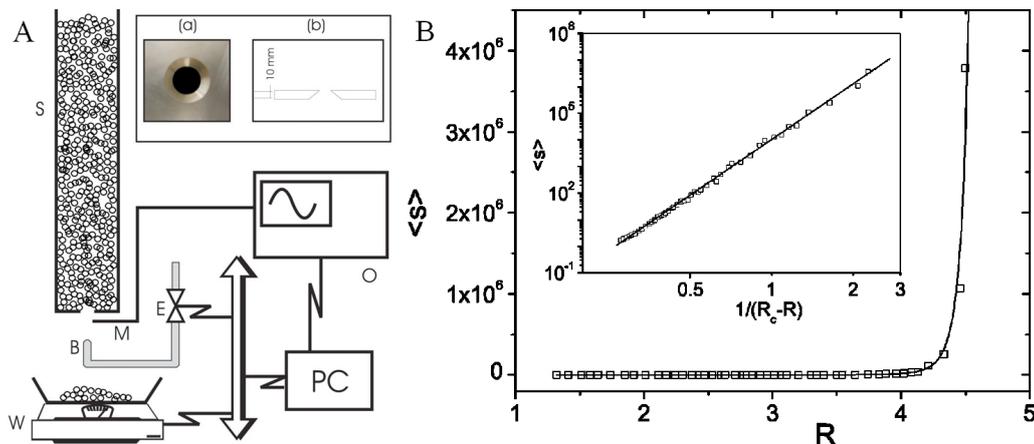


Abbildung 1.11: (A) Schematische Darstellung des Aufbaus zur Bestimmung von Ausfluss-/ Verstopfungsstatistiken (S - Silo, W - Waage, B - Luftdüse, M - Mikrophon, E, O, PC - Datenaufnahme, (a) Foto Ausfluss, (b) Querschnitt Ausfluss); (B) Mittlere Lawinengröße $\langle s \rangle$ in Abhängigkeit des dimensionslosen Radius R , dargestellt sind die experimentellen Punkte durch \square und ein Fit mit Gleichung 1.7 durch eine durchgezogene Linie mit $\gamma = 6,9 \pm 0,2$. Entnommen mit Genehmigung aus [4]. Copyright (2005) von der American Physical Society.

jeder Öffnungsgröße möglich. Die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Lawinenstopps würde dabei mit wachsender Öffnung sehr stark, exponentiell, steigen. Daher wäre es nach [105], aus praktischen Gründen sinnvoll, einen kritischen Öffnungsdurchmesser zu definieren, ab dem es enorm unwahrscheinlich ist, dass eine Verstopfung auftritt.

Weitere Untersuchungen des Ausflussverhaltens unterschiedlich geformter Granulate wurden von Jin et al. [85] experimentell und von Tao et al. [86] und Cleary et al. [84] mittels Diskreter Element Methode (DEM) ermittelt. Einige Ergebnisse werden hier kurz vorgestellt.

Experimentell [85] wurden vier verschiedene Formen, Kugeln, Ellipsoide, Hexaeder und eine binäre Mischung aus Kugeln und Hexaedern, verwendet. Bei ihrer visuellen Untersuchung in rechteckigen Silos konnte festgestellt werden, dass die Partikelform signifikant das Ausflussverhalten beeinflusst. Hierzu wurden verschiedenfarbige Streifen in einem durchsichtigen Silo präpariert, so dass Flussprofile sichtbar werden. Das Flussprofil der Kugeln, der Ellipsoide und der Mischung sind parabolisch und ändert sich nicht wesentlich bei Änderung des Ausflusswinkels. Es wird jedoch gewinkelter mit größerem Ausflussloch. Das Flussprofil der Hexaeder bleibt lange gradlinig. Die Schichten fließen über den gesamten Querschnitt gleichmäßig aus. Die Ausflussrate steigt bei gleicher Silo-Geometrie von Hexaedern über Kugeln, die Mischung bis zu Ellipsoiden an. Ausflusswinkel und -größe ändern die Rate.

In den Simulationen wurden zum einen Mais-förmige Partikel untersucht [86]. Diese wurden durch vier überlappende Kugeln beschrieben. Es ergibt sich unter anderem, dass die vertikalen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Zentrum und Wand und die horizontale Geschwindigkeit bei Mais-förmigen Partikeln größer ist als bei Kugeln.

Die andere Simulation mittels DEM [84] benutzt unterschiedlich geformte Partikel, die mittels Aspektverhältnis und einem Formparameter, der die Eckigkeit der Teilchen beschreibt, klassifiziert werden. Es können damit unter anderem die Ausflussprofile von Kugeln und von ihnen stark abweichenden Partikeln untersucht werden. Die Änderung des Formparameters von Kugeln hin zu würfelförmigen Teilchen zeigt, dass die Flussrate deutlich reduziert wird,

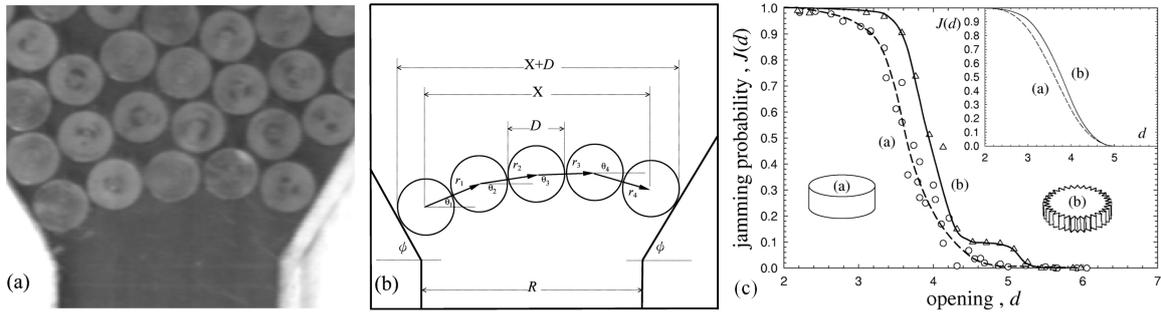


Abbildung 1.12: (a) Foto einer typischen Silo-Verstopfung, (b) Konfiguration des Bogens (a), (c) Verstopfungswahrscheinlichkeit für (links) Scheiben mit glattem und (rechts) Scheiben mit rauem Rand. Eingezeichnete Linien nur nach Augenmaß. Einsatz rechts oben zeigt den Vergleich zwischen zwei numerischen Methoden. Entnommen mit Genehmigung aus [99]. Copyright (2012) von der American Physical Society.

aber die Flussprofile kaum geändert werden. Mit Änderung des Aspektverhältnisses wird das Ausflussprofil geändert.

1.4.2 Brückenbildung und Kraftketten

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel wird hier nicht auf das Ausfließen zwischen dem Verstopfen, sondern auf die dabei gebildeten Brücken eingegangen. Die Brückenbildung wurde von To et al. [5, 99] an monodispersen glatten und rauhen Stahlscheiben des Durchmessers $D = 5$ mm in einem einlagigen Silo mit Öffnungsdurchmesser R untersucht. Dabei fällt die Verstopfungswahrscheinlichkeit für glatte Scheiben von 1 auf 0, wenn das Verhältnis R/D von 2 auf 5 steigt, wie Abbildung 1.12 (c) zeigt.

Bei jeder Verstopfung ist der horizontale Abstand $X+D$, vergleiche Abbildung 1.12 (a, b), größer als der Öffnungsdurchmesser R und überall konvex. Dies ist eine notwendige Bedingung für das statische Gleichgewicht jeder Scheibe im Bogen, wenn Reibung vernachlässigt wird. Beim Einbringen von Reibung durch raue Scheiben, kann festgestellt werden, dass nicht alle Bögen konvex sind. Außerdem steigt die Verstopfungswahrscheinlichkeit bei gleichbleibender Öffnung, wie in Abbildung 1.12 (c) zu sehen ist.

Im Weiteren wird für unterschiedliche Öffnungswinkel festgestellt, dass wenn diese sehr groß werden, die Verstopfungswahrscheinlichkeit vom Flussmuster vor dem Verstopfen abhängt.

Die Form solcher Bögen wurde näher von Garcimartín et al. [97] untersucht. Für die experimentellen Studien wurde ein zweidimensionales Silo verwendet. Es wurden die Anzahl der verwendeten Stahlkugeln des Bogens, die Zentrums- und Randpartikel, die Winkel zwischen einzelnen Teilchen und das Aspektverhältnis des Bogens in Abhängigkeit der Öffnung bestimmt. Als Bogen wird die erste Reihe von Teilchen über der Öffnung betrachtet.

Die Anzahl der Teilchen des Bogens steigt linear von im Mittel knapp vier Partikeln für eine Öffnung, die 2,2-mal so groß ist, wie der Kugeldurchmesser auf knapp 7 Partikel für eine 4,7-mal so große Öffnung. Es können Winkel zwischen Nachbarpartikeln, die größer als 180° sind, gefunden werden.

Für große Spannweiten des Bogens, verglichen mit der Siloöffnung, ergeben sich Aspektverhältnisse des Bogens von Eins. Dabei ist die Höhe des Bogens gleich der halben Spannweite. Des Weiteren wird festgestellt, dass die Wahrscheinlichkeit ein weiteres Teilchen zum Bogen

zuzufügen, unabhängig von der Bogengröße ist.

Tang und Behringer [98] untersuchten mittels eines zweidimensionalen Silos, gefüllt mit Scheiben, einer Hochgeschwindigkeitskamera und Partikelverfolgung, aus welchen Partikeln sich diese Bögen zusammensetzen werden. Exakt die Teilchen, die am Bogen beteiligt sind, können jedoch nicht vorausgesagt werden. Die Verstopfungsteilchen stammen von ungefähr der gleichen radialen Position.

Die Kenntnis mikroskopischer Spannungen kann ebenfalls Informationen über den Verstopfungsprozess liefern. Dazu werden photoelastische Scheiben unter gekreuzten Polarisatoren betrachtet. Damit zeigen sie Interferenzmuster, die die Kräfte im Material verdeutlichen. Über der Öffnung ist dabei ein Kraftbogen zu erkennen.

Weitere Untersuchungen mit photoelastischen Scheiben in zwei Dimensionen wurden von Vivanco et al. [107] und Wambaugh et al. [108] vorgenommen. In der zuerst zitierten Publikation wurden Kraftketten während dem Ausfluss aus dem Silo und bei einer Verstopfung gefunden. Bei fließendem Granulat können Kraftketten zwischen den Partikeln von einem Rand des Silos zum anderen oder auch nicht-Bogen-bildende Ketten beobachtet werden. Dabei wird der Ausfluss nicht durch dieses zeitweilige Kraftnetzwerk bestimmt. Das Netzwerk kann jedoch für Geschwindigkeitsfluktuationen sorgen.

1.4.3 Dreidimensionale Studien

Um Informationen über den Granulatfluss in Silos zu erhalten, werden auch dreidimensionale Studien, die das Innere des Materials betrachten, durchgeführt.

Zum einen wurden experimentell von Grudzień et al. [101] mittels Röntgentomografie quantitative Volumenänderungen beim Ausfluss eines rechteckigen Silos bestimmt. Hierzu wurde Sand aus dem durchsichtigen Silo mit entweder glatten oder rauen Wänden ausfließen lassen. Das Silo wurde dabei zwischen Röntgenquelle und Detektor platziert, um Aufnahmen zu erhalten, aus denen die Volumenänderung ermittelt werden kann. Außerdem fanden sie heraus, dass die Scherzone an der Wand der Apparatur und die Volumenänderungen mit größerer Wandrauigkeit bzw. -reibung steigen. Diese Methode wurde quantitativ mit den Ergebnissen aus der Analyse mittels Particle Image Velocimetry, kurz: PIV, eine Messmethode zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern, verglichen. Beide ergeben sehr ähnliche Resultate.

Die Brücke zwischen Experiment und Simulation wird von Tsukahara et al. [103] geschlagen. Sie untersuchten das Verhalten von Granulat in Silos mittels Röntgentomografie, gekoppelt mit DEM-Simulationen. Dazu wird von einer polydispersen Mischung von Glaskugeln, jeweils kurz nach dem Öffnen des Auslasses des befüllten Silos und nach dem Verstopfen, eine dreidimensionale Aufnahme erstellt. Das Verhalten dazwischen wird mittels DEM-Simulationen ergänzt. Die Endpositionen der Partikel werden dabei sehr gut ermittelt.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Messverfahren: Computertomografie

Es werden zwei Arten von Experimenten durchgeführt und mittels Computertomografie, kurz CT, untersucht. Diese Technik wird, basierend auf [109], kurz erläutert. Computertomografie ist ein Bildaufnahmeverfahren, bei dem Röntgenbilder des Untersuchungsobjekts aus verschiedenen Richtungen aufgenommen werden und mittels eines Computers wird daraus ein dreidimensionales Bild errechnet. Die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Röntgenstrahlen (Elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von 10 nm bis $6 \cdot 10^5$ nm [110]) durchdringen den Untersuchungsgegenstand. Dabei werden die Photonen durch Wechselwirkungen mit den Atomen, des durchdrungenen Volumens, abgeschwächt. Durch Absorption und Streuung wird die Intensität der auf dem Detektor erfassten Strahlung geändert. Bei stärkeren Unterschieden durchdrungener Materialien wird der Kontrast des resultierenden Röntgenbildes erhöht, wohingegen durch Streuung eine Kontrasterniedrigung durch ungerichtete Belichtung eintritt. So werden z.B. im weit verbreitetsten Anwendungsgebiet, der diagnostischen Medizin, Knochen und umliegendes weiches Gewebe unterschiedlich dunkel dargestellt. [109]

Die auf den Detektor auftreffende Röntgenstrahlung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das Bild so digitalisiert. Aus den Werten erfolgt die Bildberechnung der einzelnen Tomogrammschichten. [109]

Moderne Computertomografie-Apparate haben eine auf einem beweglichen Roboterarm montierte Hochleistungs-3D-Röntgenanlage, die schnell und präzise Röntgen- und Computertomografie-Bilder des Patienten aus jeder Position erstellen kann.

Mit Computertomografen können auch Granulate untersucht werden. Dadurch können innen-

liegende Partikel ohne äußere Störung betrachtet werden, um z.B. die Ausrichtung einzelner Teilchen zu erfassen oder die Packungsdichte des Granulats zu ermitteln. Für diese Arbeit wurden alle Aufnahmen mit dem Tomografen „Multiachsen-System Siemens Artis zeego“, in Abbildung 2.1 dargestellt, erstellt. Bei diesem Aufnahmesystem sind Röntgenquelle (im Bild: mittig, unten) und -detektor (mittig oben) an einem beweglichen C-förmigen Arm montiert. Die Röntgenstrahlen gelangen von der Quelle durch die Probe, die sich auf dem Patiententisch (links, mittig) befindet,

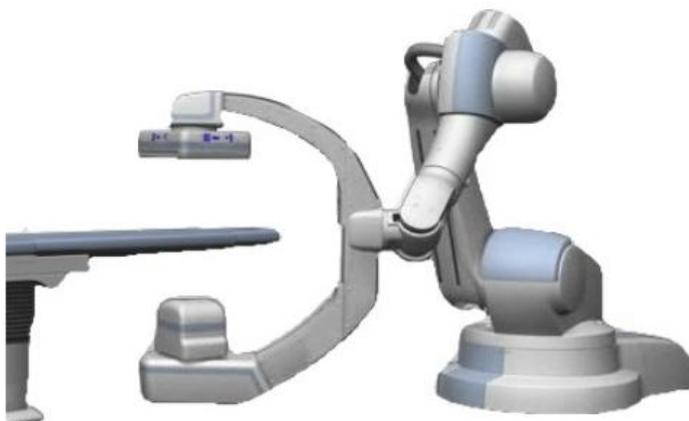


Abbildung 2.1: Computertomograf „Multiachsen-System Siemens Artis zeego“. Entnommen aus [111].

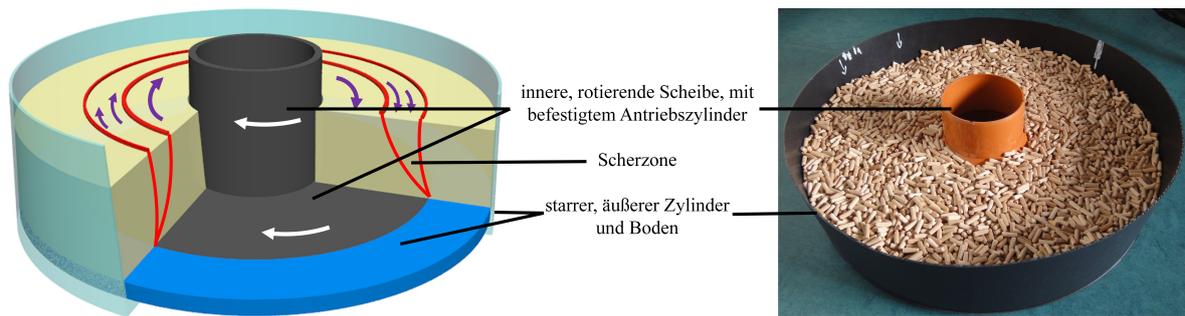


Abbildung 2.2: Modifizierte Couette-Zelle, links: schematisch mit eingezeichneter Scherzone, rechts: Foto des Aufbaus mit einem Versuchsmaterial (Dübel, $d = 5 \text{ mm}$, $l = 25 \text{ mm}$) gefüllt. Der innere Bereich der Zelle wird zur Scherung des Materials gedreht. Maße der Zelle: Durchmesser innerer Zylinder: $D_{\text{innen}} = 16 \text{ cm}$, Durchmesser rotierender Abschnitt: $D_{\text{drehbar}} = 38 \text{ cm}$, Außendurchmesser: $D_{\text{außen}} = 57 \text{ cm}$, maximale Füllhöhe: $H_{\text{max}} = 14 \text{ cm}$.

auf einen $40 \times 40 \text{ cm}^2$ Flach-Panel Röntgen-Detektor. Es werden Aufnahmen aus mehreren Winkeln erstellt, indem der C-Arm um den Tisch rotiert. Diese werden dann zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt.

2.2 Scherexperimente

Die erste Art von Experimenten wird in einer modifizierten Couette-Zelle, schematisch und als Foto in Abbildung 2.2 gezeigt, durchgeführt. Die Zelle besteht aus einem äußeren Behälter mit Durchmesser $D_{\text{außen}} = 57 \text{ cm}$ und einem inneren beweglichen Teil, das sich aus einem Zylinder mit Durchmesser $D_{\text{innen}} = 16 \text{ cm}$ und einer daran befestigten Scheibe mit $D_{\text{innen}} = 38 \text{ cm}$ zusammensetzt. Der gesamte Boden ist mit Sandpapier beklebt, so dass das eingefüllte Material mitgeführt wird und nicht über diesen rutscht. Der Innenbereich des Aufbaus kann per Hand gedreht werden, so dass dort, wo das Granulat aneinander vorbei bewegt wird, ein Scherbereich im Granulat entsteht. Der Aufbau wird so im Computertomografen positioniert, dass die Scherzone in einem Teil der Zelle aufgenommen wird. Die Aufnahme zeigt daher den Teil des Containers zwischen innerem und äußerem Zylinder, wie in Abbildung 2.3 rot dargestellt. Das Volumen der Aufnahme-region beträgt $25,2 \text{ cm} \times 25,2 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$, was $512 \times 512 \times 387$ Voxeln entspricht.

Die verwendeten Granulate für die Scher-, als auch die Silo-Experimente, sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Es werden fünf Arten von Zylindern, Holzdübeln und Glasstäbchen, mit je anderem Aspektverhältnis $Q = L/D$ verwendet. Von links nach rechts in der oberen Reihe der Bilder beträgt das Verhältnis 8, 5, 3,3 und 2 (Holzdübel) und 3,5 (Glasstäbchen). Diese werden im Folgenden nach ihren Aspektverhältnissen Q_8 , Q_5 , Q_3 , Q_2 und $Q_{3,5}$ genannt. Des Weiteren werden zwei Arten von Kugeln bzw. annähernd Kugeln, Soft-Ball-Munition und Erbsen, benutzt. Ihre Aspektverhältnisse betragen 1. Außerdem werden Schokoladenlinsen als oblate (platte) Ellipsoide im Vergleich zu prolaten Dübeln verwendet. Das letzte im Bild gezeigte Material sind Kidneybohnen, die drei unterschiedlich lange Achsen haben.

Zum Durchführen eines Scherexperiments wird zuerst ein Material in die Versuchszelle eingefüllt, bis eine Höhe mehrerer Partikellagen entsteht. Für die hier untersuchten Granulate werden Füllhöhen von 6 bis 7 cm verwendet. Diese werden jeweils bei den Ergebnissen angegeben. Danach wird je nach Experimentart - stationäre Messung, Einlaufen in den stationären

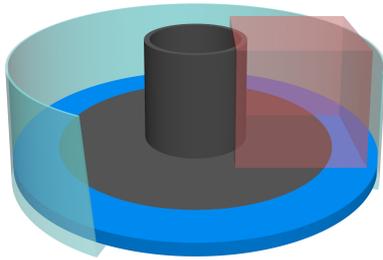


Abbildung 2.3: Scherzelle mit rot eingefärbtem Aufnahmebereich der Größe 25,2 cm x 25,2 cm x 19 cm des Computertomografen.

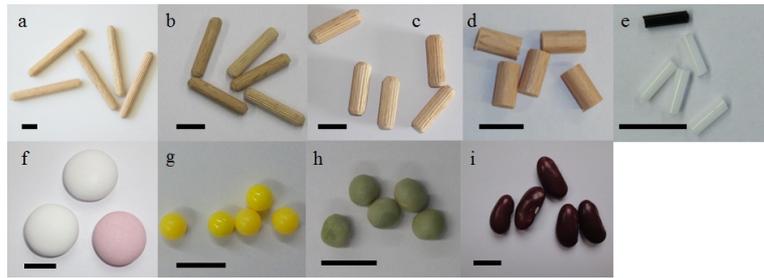


Abbildung 2.4: Verwendete Materialien für beide Experimentarten, der schwarze Balken entspricht der Länge von 1 cm. (a) Dübel, Durchmesser $d = 5$ mm, Länge $l = 40$ mm, Bezeichnung: Q8, Äquivalenzradius: $r_{eq} = 5,7$ mm; (b) Dübel, $d = 5$ mm, $l = 25$ mm, Q5, $r_{eq} = 4,9$ mm; (c) Dübel, $d = 6$ mm, $l = 20$ mm, Q3, $r_{eq} = 5,1$ mm; (d) Dübel, $d = 5$ mm, $l = 20$ mm, Q2, $r_{eq} = 3,6$ mm; (e) Glasstäbchen, $d = 1,9$ mm, $l = 6,6$ mm, Q3,5, $r_{eq} = 1,7$ mm; (f) Schokoladenlinsen $d = 18,5$ mm, $l = 8,3$ mm, $r_{eq} = 8,1$ mm; (g) Soft-Ball-Munition, $d = 6$ mm; (h) Erbsen, $d = 7,2$ mm; (i) Kidneybohnen $d_1 = 8,1$ mm, $d_2 = 6$ mm, $l = 16,5$ mm. Der Äquivalenzradius eines anisometrischen Stäbchens entspricht dem Radius einer Kugel mit Volumen des länglichen Teilchens, $r_{eq} = \sqrt[3]{3V_{\text{Teilchen}}/4\pi}$. So geht das Volumen bzw. eine mittlere Ausdehnung der Partikel mit in die Betrachtung ein.

Zustand oder Umkehrung der Drehrichtung - der innere Teil der Zelle verschieden weit gedreht und das innen liegende Material somit verschieden weit verschoben. Für stationäre Messungen, etwa zur Ermittlung der Lage der Partikel in der Scherzone oder der Packungsdichtebestimmung, werden zuerst ca. 10 Umdrehungen vollzogen. Danach werden Computertomografieaufnahmen von verschiedenen Konfigurationen erstellt, die jeweils mindestens eine viertel Umdrehung auseinanderliegen. Für Messungen zum Einlaufen in den stationären Zustand oder die Umkehrung der Scherrichtung werden kleine Drehungen von ca. 2° verwendet.

Im Folgenden werden verschiedene Methoden zur Untersuchung der Aufnahmen des Granulats im Versuchsaufbau vorgestellt, die ebenfalls zur Auswertung der Experimente mit verstopften Silos verwendet werden. Die erstellten Computertomografieaufnahmen werden dafür mit eigens dafür erstellten Matlabprogrammen ausgewertet.

2.2.1 Ermittlung der Lage und Ausrichtung von Partikeln

Im ersten Verarbeitungsschritt der Aufnahme werden 387 Einzelbilder der Größe 512 x 512 Pixel eingelesen, ihr Kontrast erhöht, der zu betrachtende Teil ausgeschnitten, in schwarz-weiß konvertiert und letztendlich zu einem dreidimensionalen Volumen zusammengefügt. Dies ist beispielhaft für eine Aufnahme der Dübel Q5 in Abbildung 2.5 dargestellt. Gegebenenfalls schließt sich hier eine morphologische Operation an, die kleine schwarze Löcher, die vollständig von weißen Voxeln (granuläres Material) umgeben sind, im Volumen füllt. Dies ist nötig, da die verwendeten natürlichen Granulate Löcher in ihrem Inneren aufweisen können.

Im Weiteren werden die Operationen auf das Gesamtvolumen angewendet. Zuerst werden die Farben invertiert, um den nächsten Arbeitsschritt, die Euklidische-Abstands-Transformation, durchführen zu können. Dabei wird jedem Voxel der Abstand zum nächsten Voxel ohne Granulat (hat den Wert Null) zugewiesen. Damit wachsen die Werte zur Mitte der Partikel hin, wobei

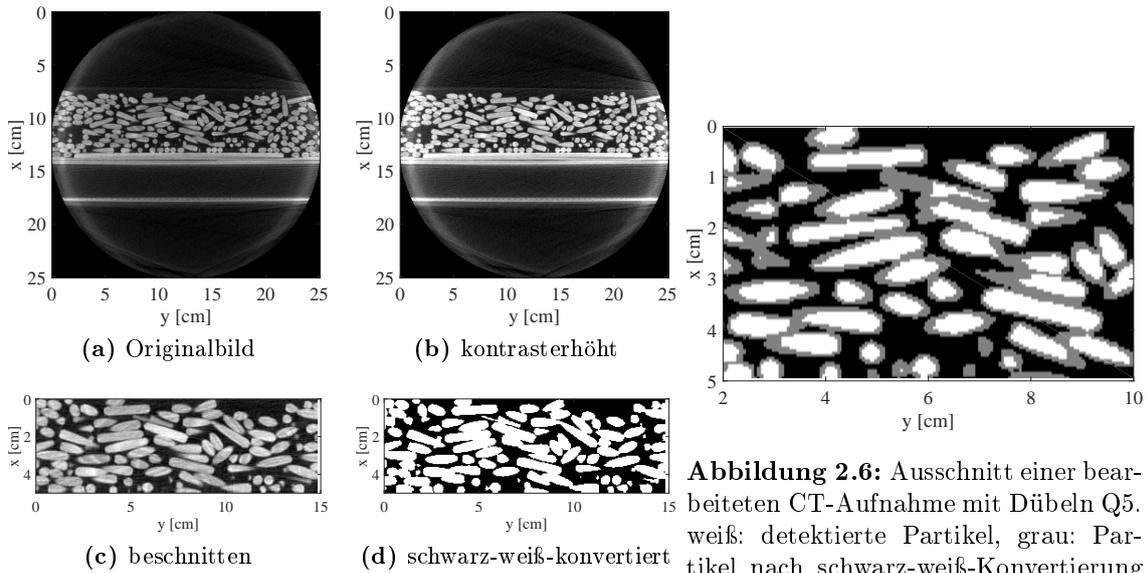


Abbildung 2.6: Ausschnitt einer bearbeiteten CT-Aufnahme mit Dübeln Q5. weiß: detektierte Partikel, grau: Partikel nach schwarz-weiß-Konvertierung (vergleiche Abbildung 2.5 (d))

Abbildung 2.5: Bearbeitung der jeweils einzelnen Tomogrammschichten. Nach dem Einlesen des Originalbilds in Matlab (a) wird der Kontrast erhöht (b) und der relevante Bereich herausgeschnitten (c) und der Schnitt in schwarz-weiß konvertiert (d).

sie bei einem bestimmten Maximalwert begrenzt werden. Im Anschluss wird die Watershed-Transformation angewendet und die Teilchen automatisch nummeriert. Hier können noch verschiedene Formen im Volumen gefunden werden. Um nur richtige Partikel zu erfassen, werden Teilchen der richtigen Größe und Form herausgefiltert. Die Größe der Partikel ist über die Anzahl der zusammenhängenden weißen Voxel gegeben. Die Form wird über den Trägheitstensor jeden Teilchens überprüft. Wenn die Hauptträgheitsmomente, die Eigenwerte des Tensors, ein geeignetes Verhältnis zueinander aufweisen, wird das Objekt als Granulatteilchen gewertet. Dabei wird ermittelt ob ein längliches Objekt vorliegt. Mittelpunkt und Ausrichtung, Hauptträgheitsachse des Teilchens zum kleinsten Eigenwert für elongierte Partikel und zum größten Eigenwert für oblate Teilchen, werden für alle als richtig gefundenen Objekte abgespeichert. Für die Materialien mit vergleichsweise großen und gleichförmigen Partikeln wird durchschnittlich ein Partikel in der Scherzone eines Tomogramms nicht erkannt, was weniger als einem Prozent entspricht. Für die Q2-Dübel und die Kidneybohnen liegt die Quote bei ca. 2 bis 3 %. Beispielhaft sind die in einem Tomogramm gefundenen Partikel in Abbildung 2.6 weiß für Q5-Dübel dargestellt. Die grauen Flächen sind die nach der schwarz-weiß-Konvertierung erhaltenen Objekte.

Soll die Ausrichtung der Partikel in bestimmten Bereichen der Scherzelle, wie z.B. der Scherzone, berechnet werden, wird zuerst der Mittelpunkt der Zelle über Koordinaten der Kante der drehbaren Scheibe ermittelt. Im Weiteren werden die Teilchenausrichtungen jeweils in einem lokalen Koordinatensystem aus Tangente, Normale und Vertikale, das den Ursprung im Mittelpunkt des Partikels hat, betrachtet. Ein mittlerer Winkel und der Ordnungsparameter des Systems kann über den Ordnungstensor zweiter Stufe, siehe Formel 1.5, errechnet werden. Für Partikel mit drei unterschiedlichen Hauptachsen findet außerdem die Formel 1.6

Anwendung. Mit ihr wird näherungsweise die Phasen-Biaxialität $D' = S_{aa}^{ZZ} - S_{bb}^{ZZ}$ ermittelt. Dazu wird zunächst mittels des zweistufigen Tensors der Ordnungsparameter $S = S_{cc}^{ZZ}$ und der biaxiale Ordnungsparameter $D = S_{cc}^{YY} - S_{cc}^{XX}$, sowie das System aus Eigenvektoren ermittelt. Dieses Koordinatensystem wird als Basis verwendet, um die Einträge S_{aa}^{ZZ} und S_{bb}^{ZZ} , vergleiche Formel 1.6, zu berechnen. Die Phasen-Biaxialität D' entspricht der Ordnung der kurzen Teilchenachsen a und b in Bezug auf den Direktor. Der vierte Ordnungsparameter $D'' = (S_{aa}^{XX} - S_{aa}^{YY}) - (S_{bb}^{XX} - S_{bb}^{YY})$ wird ebenfalls berechnet. Er ist die Differenz der Phasen-Biaxialität der a- und b-Teilchenachsen.

Für die Lagebestimmung der Soft-Ball-Kugeln wurde ein von T. Finger geschriebenes Matlab-Programm verwendet und angemessen vereinfacht. Dabei werden im resultierenden Programm mittels eines kugelförmigen Strukturelements über Erosion und Dilatation im dreidimensionalen Volumen Kugeln detektiert. Ihre Mittelpunkte werden gespeichert.

2.2.2 Packungsdichtenbestimmung

Die lokale Packungsdichte kann für Einzelmessungen oder für eine bessere Statistik aus vielen Messungen bestimmt werden. Die erste Möglichkeit wird für Entwicklungsmessungen, wie das Einlaufen in den stationären Zustand verwendet, da hier nur sehr schwer genau die gleiche kleine Rotation des inneren Zellelements für verschiedene Messreihen hervorgerufen werden kann. Die zweite Variante wird für den stationären Zustand verwendet.

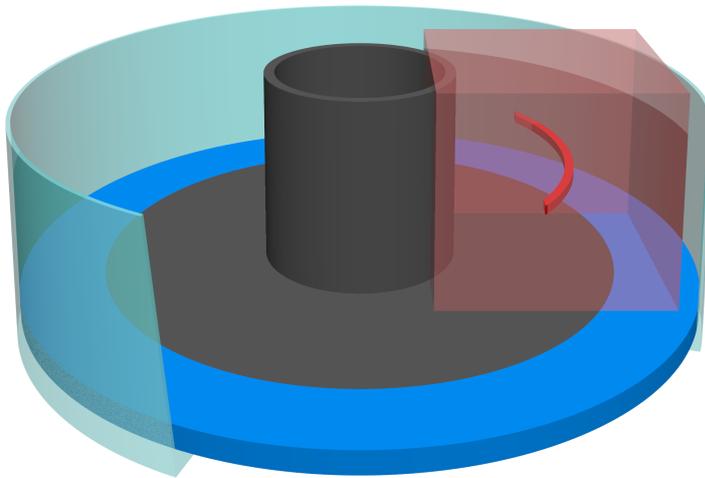


Abbildung 2.7: Veranschaulichung der Mittelung bei lokaler Packungsdichteberechnung. Im Tomogramm (durchsichtiges, rotes Volumen) oder der Addition der Tomogramme wird über eine gekrümmte Kurve (rot) gleichen Abstands zum Drehzentrum in gleichbleibender Höhe gemittelt.

Für die erste Variante wird ein Tomogramm eingelesen. Anschließend wird es in schwarz-weiß konvertiert. Dabei wird beachtet, dass der schwarz-weiß-Schwellwert so gewählt wird, dass die Ursprungsgröße der Objekte gewahrt bleibt. Gegebenenfalls werden schwarz dargestellte Löcher in den weißen Partikeln gefüllt. Für die zweite Variante werden alle zugehörigen Tomogramme eingelesen, in schwarz-weiß konvertiert und unter Beachtung einer eventuellen Verschiebung zwischen zwei Aufnahmen addiert. Anschließend wird jeder Punkt dieses Volumens durch die jeweils für ihn eingegangene Anzahl der Messungen dividiert.

Danach wird bei beiden Varianten gleich verfahren. Für einen Punkt im entstehenden Packungsdichtebild werden alle Voxel auf gleicher Höhe und mit gleichem Abstand zum Drehzentrum der Scherzelle gemittelt. Im Weiteren wird optional für jeden Punkt im Packungsdichtebild der Durchschnitt einer kleinen Nachbarumgebung von 9 bis 25 Pixeln gebildet. Veranschaulicht ist die für einen resultierenden Pixel im Packungsdichtebild verwendete Zone der Scherzelle in Abbildung 2.7.

2.2.3 Bestimmung des Zellenrotationswinkels bzw. der Scherverformung mittels Partikelverfolgung

Um zeitliche Verläufe einer Scherung, wie hier den Verlauf einer Packungsdichte, quantitativ zu erfassen, ist ein Maß für die Verschiebung der Teilchen notwendig. Zum einen kann die Verschiebung als Zellenrotationswinkel, wie weit der innere Teil des Versuchsaufbaus gedreht wurde, angegeben werden. Zum anderen ist dies auch unabhängig vom jeweiligen Aufbau und der Anzahl von Rotationen möglich. Hierzu kann die maximale lokale Scherverformung, auch Scherung, ermittelt werden. Für beide Angaben werden einzelne Partikel während der Rotation verfolgt.

Die Partikelverfolgung für die Ermittlung des Drehwinkels erfolgt bei einem kleineren Zellradius als dem Scherzonenradius. Hier werden die Teilchen vollständig mit dem Untergrund mitbewegt, so dass die Rotation an der Verschiebung der Teilchen abgelesen werden kann. Das verwendete Programm basiert auf einem Matlab-Code von T. John, der auf dieses Problem angepasst und erweitert wurde.

Zuerst werden die Koordinaten und Ausrichtungen der Teilchen im Zellradius von 13 cm bis 14 cm (Scherzone ca. bei 17 bis 21 cm), die wie oben beschrieben, gewonnen wurden, eingelesen. Die Daten für den Ausgangszustand können noch nicht, wie ab dem zweiten Schritt, mit vorherigen Daten verglichen werden. Die Abstände der Teilchen des zweiten Schritts werden zum ersten berechnet. Der kleinste Abstand wird dann für jedes Teilchen gesucht und überprüft, ob er unter einer maximal möglichen Verschiebung liegt. Ab dem dritten Schritt wird dann der Abstand unter Einbeziehung der vorherigen Bewegung berechnet: $\sqrt{(x_n - (x_{n-1} + dx_{n-2,n-1}))^2 + (y_n - (y_{n-1} + dy_{n-2,n-1}))^2 + (z_n - (z_{n-1} + dz_{n-2,n-1}))^2}$ mit dx , dy , dz - Verschiebung in x, y, z-Richtung zwischen 2 Drehungen. Wenn die Verschiebungen der Partikel für alle Zeitschritte berechnet sind, wird die mittlere Verschiebung pro Zeitschritt aus diesen Partikeln und daraus ein mittlerer Rotationswinkel berechnet.

Für die Ermittlung der maximalen lokalen Scherung wird zuerst eine Partikelverfolgung für Teilchen oberer Granulatschichten der Scherzone, wie oben beschrieben, durchgeführt. Die Scherrate $\dot{\gamma}$ kann mittels Formel 2.1 berechnet werden.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv(r)}{dr} - \frac{v(r)}{r} \quad (2.1)$$

r - Radius

v - tangentielle Geschwindigkeit

Nach einigen Umformungen ergibt sich die Scherung γ zu

$$\gamma = \frac{d(s(\alpha, r) - s(\alpha, 0))}{dr} - \frac{s(\alpha, r) - s(\alpha, 0)}{r}. \quad (2.2)$$

α - Drehwinkel der Platte

ds - Verschiebung einzelner Teilchen

Eine detaillierte Herleitung befindet sich im Anhang A.1.

2.2.4 Ermittlung der Granulatoberfläche

Um eine mittlere Granulatoberfläche des Materials im Versuchsaufbau als Funktion des Abstands zum Mittelpunkt der Scherzelle zu ermitteln, werden die vorliegenden Durchschnitte,

die Packungsdichtebilder, verwendet. Für jedes Pixel in Richtung der Achse des Abstands zum Mittelpunkt wird über einen Schwellwert die Grenze zwischen Gebieten gesucht, in denen bei vielen Experimenten Material vorhanden ist oder nicht.

2.3 Siloexperimente

Für den abrupten Abbruch eines Granulatscherflusses wird das Verstopfen eines Silos betrachtet. Das verwendete Silo ist in Abbildung 2.8 gezeigt. Es ist ein kleiner Zylinder mit einem Boden, in dem der Bereich der Öffnung austauschbar ist. Dazu wurde der eigentliche Boden des als Zylinder verwendeten Eimers entfernt und durch eine durchsichtige Plexiglasplatte ersetzt. In dieser befindet sich eine quadratische Öffnung, in die Plexiglasplatten mit runden Öffnungen verschiedener Durchmesser eingelegt werden können. Einige Versuche werden mit rechteckigen Öffnungen durchgeführt. Diese werden durch das Einlegen rechteckiger Platten realisiert, vergleiche Abbildung 2.8 d.

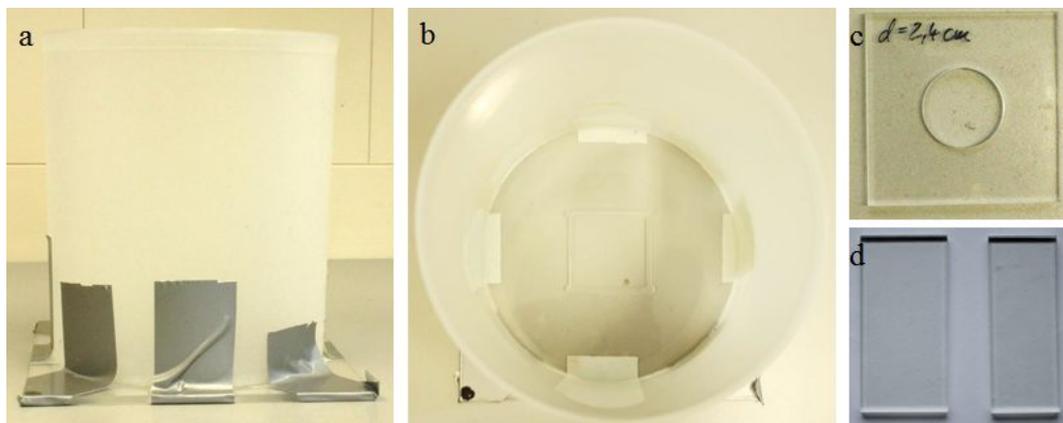


Abbildung 2.8: (a) Silo der Höhe 21,4 cm und eines sich leicht verringernden Durchmessers von oben 19,0 cm und unten 18,8 cm von der Seite und (b) von oben. Im Boden ist eine quadratische Öffnung vorhanden, um Plättchen, wie (c) mit verschiedenen großen runden oder (d) rechteckigen Öffnungen einzulegen. Die Öffnung ist 5,2 cm x 5,2 cm groß. Die seitlichen Stege, die zum Halten des Plättchens dienen, sind 3,5 mm breit.

In dieser Arbeit wird vor allem auf Ergebnisse dieser Geometrie eingegangen. Es wurden einige Experimente in anderen Silos, einem trichterförmigen und einem rohrförmigen mit sich verjüngendem Querschnitt, durchgeführt.

Zum einen werden Computertomogramme von verschiedenen Verstopfungen im Silo mit runder Öffnung erstellt. Dabei können die eingefüllten Materialien und die Öffnungsdurchmesser variiert werden. Zu jeder Kombination werden mindestens 30 Aufnahmen erstellt. Hier werden verschiedene Aspekte, wie die Orientierung der Teilchen im Silo, die Packungsdichte und die erste Lage von Partikeln am Ausfluss betrachtet. Für die erste Schicht wird die Anzahl der Teilchen, die an der Schicht beteiligt sind und ihre Lage untersucht.

Zum anderen werden Fotos nach dem Verstopfen von unterhalb des Silos erstellt, um die Anzahl der Partikel in der ersten Lage bestimmen zu können. Zum besseren Zählen der Partikel dient die Durchsichtigkeit des Silobodens. Des Weiteren wurden einige Experimente durchgeführt, bei denen von unten in die Öffnung des Silos Farbe gesprüht wurde. Damit sollen die Partikel, die den Dom bilden, identifiziert werden.

2.3.1 Bestimmung fließender Schichten

Zuerst wird betrachtet, welche Granulatgebiete im Silo mit runder Öffnung fließen. Hierzu werden je 30 Tomogramme pro Material und Öffnungsdurchmesser untersucht. Aus der Differenz verschiedener Tomogramme kann ermittelt werden, welche Bereiche aus dem Silo ausfließen. Eine genauere Beschreibung der Methode ist Anhang A.4 zu entnehmen.

2.3.2 Ausrichtungsbestimmung der Teilchen

Die Ausrichtung und Lage von Teilchen wird wie die in der Scherzelle, vergleiche Kapitel 2.2.1, bestimmt. Zuerst werden die Ränder des Silos weggeschnitten und auch hier die Partikel im Volumen gesucht, so dass dann ihre Lage bekannt ist. Die Ausrichtungen der Partikel können anschließend über den jeweiligen Trägheitstensor bestimmt werden.

Der Ordnungsparameter des Systems wird, mittels Ordnungstensor, aus den Richtungen der Teilchen bestimmt. Dazu wird jedes Teilchen in einem Koordinatensystem, das eine normale, eine radiale und eine vertikale Achse besitzt, betrachtet. Des Weiteren kann der Ordnungsparameter aus dem Winkel der Partikel zu einer bestimmten Achse errechnet werden. In Flüssigkristallen wird diese Bestimmung genutzt. Hier wird der Winkel der Teilchenachse zur lokalen mittleren Ausrichtung $\tilde{\Theta}$ verwendet [112]:

$$S = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N (3 \cos^2 \tilde{\Theta}_n - 1) \quad (2.3)$$

2.3.3 Packungsdichtebestimmung

Bei der Bestimmung der lokalen Packungsdichte wird hier ähnlich verfahren, wie bei ihrer Bestimmung in der Scherzelle, vergleiche Kapitel 2.2.2. Der Mittelungsbereich verläuft hier jedoch durch den gesamten Aufbau, wie in Abbildung 2.9 rot dargestellt. Es wird über Punkte gleichen Abstands zur Symmetrieachse des Silos, die auf gleicher Höhe liegen, gemittelt. Es werden jeweils mindestens 30 Tomogramme verwendet.

Zeitliche Verläufe und damit Mittelungen von Einzeltomogrammen können nicht durchgeführt werden, da der Computertomograf ca. eine Minute für eine Messung benötigt und damit keine dynamischen Prozesse abgebildet werden können.

Des Weiteren werden für einige der verwendeten Materialien zusätzlich zwei andere Geometrien, Trichter und ein sich nach unten verjüngendes Rohr, verwendet. Die Trichter haben einen oberen Durchmesser von $D = 20$ cm und untere von $D = 2,4$ cm, $D = 3,1$ cm und $D = 3,6$ cm. Der Öffnungswinkel, hier der Winkel der schrägen Außenwand zum Boden, beträgt 54° . Das Rohr besitzt oben einen Durchmesser von 9,8 cm, im oberen Mittelstück 7 cm, im unteren 4,5 cm und am unteren Auslassende einen Durchmesser von 3,8 cm.

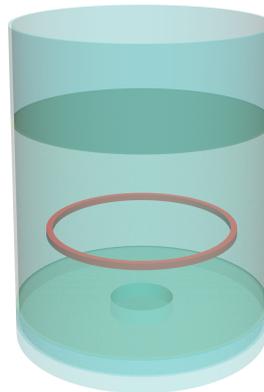


Abbildung 2.9: Veranschaulichung der Mittelung bei lokaler Packungsdichteberechnung. Es wird über die gekrümmte Kurve (rot) gleichen Abstands zum Drehzentrum in gleichbleibender Höhe gemittelt.

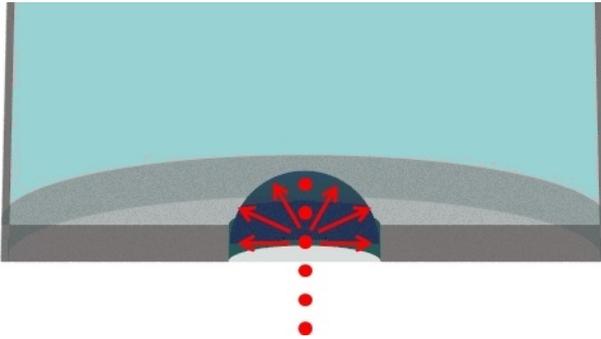


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Domsuche in einer Computertomogrammaufnahme im Querschnitt des unteren Teils des Silos. Von verschiedenen Punkten, hier rot, unterhalb des Silos und im Dom (blau) wird in alle Richtungen nach Teilchen gesucht (bei einem Punkt durch Pfeile dargestellt) um sicherzugehen alle Teilchen der ersten Lage zu erfassen.

2.3.4 Bestimmung der ersten Lage von Teilchen am verstopften Ausfluss

Zum einen kann die Grenze zwischen mittlerem Dom und darunter liegendem Freiraum aus Packungsdichtebildern ermittelt werden. Dazu wird die mittlere Packungsdichte in unbewegten Bereichen des Silos für jedes Material bei jeder Lochgröße gefunden. Die Linie der Packungsdichte mit der Hälfte dieses Werts nahe der Siloöffnung wird dann als Dombegrenzung verwendet.

Zum anderen kann die Anzahl und die Orientierung der Teilchen des Doms aus der Detektion aller Partikel ermittelt werden. Dazu werden zuerst Ausrichtungen und Mittelpunkte aller Teilchen im Silo bestimmt, vergleiche Kapitel 2.3.2. Diese Teilchen werden um den Faktor 1,5 vergrößert und dann an den richtigen Orten mit den richtigen Ausrichtungen rekonstruiert. Der Boden des Silos wird ebenfalls erstellt.

Mittels eines Matlabcodes wird dann von verschiedenen Punkten auf der Rotationsachse des zylindrischen Silos in alle Raumrichtungen in 10° -Schritten ermittelt, wo sich der erste Partikel in diese Richtung befindet. Als Ausgangspunkte werden dafür welche unterhalb des Silos und im Silo bis zu dem Punkt an dem Partikel beginnen, ausgewählt. Verdeutlicht werden diese Punkte in Abbildung 2.10. Zur Realisierung dieser Vorgehensweise wird für jeden Winkelschritt ein Volumen erstellt, das nur auf einer Verbindungslinie zwischen Ausgangspunkt und einem 100 Pixel entfernten Punkt in die richtige Richtung Eins-Einträge hat. Dieses wird mit dem Volumen der rekonstruierten Teilchen multipliziert und der erste Eintrag, somit das nächste Teilchen gespeichert.

Die eingangs erwähnte Vergrößerung der Teilchen dient dem Schließen von Lücken zwischen den Teilchen. So werden nur wenige Partikel hinter der ersten Lage gefunden.

Nachdem alle Winkel durchlaufen wurden, kann die erste Lage, im Folgenden auch Dom genannt, mit Partikeln in Originalgröße erstellt werden.

2.3.5 Ermittlung der Anzahl der ersten Lage mit alternativen Methoden

Zur Ermittlung der Anzahl der Teilchen in der ersten Lage am Auslass des Silos bei Verstopfen, können zwei alternative Methoden angewendet werden. Dazu wird das Silo, siehe Abbildung 2.11, auf einen Tisch mit einer Öffnung gestellt. Durch die Öffnung ist über einen Spiegel, der auf einem schrägen Halter unter dem Tisch angebracht ist, mittels einer Kamera EOS 550D, der Boden des Silos aufnehmbar. Die Beobachtung über den Spiegel findet zur besseren Bedienbarkeit der Kamera und eventuellen Lawinen aus dem Silo, die durch Berührung des Tisches ausgelöst werden können, statt.

Es werden verschiedene Materialien bei unterschiedlichen Öffnungsdurchmessern untersucht. Die einzelnen Partikel werden dann aus den Bildern per Hand ausgezählt. Zu jedem Material

2 Versuchsaufbau und Durchführung

werden bei jeder Lochgröße mindestens 30 Experimente durchgeführt. Diese Methode ist die einzige bei rechteckiger Siloöffnung verwendete.

Des Weiteren wird die erste Lage über das Ansprühen der Partikel am Ausfluss mit verdünnter Tinte ermittelt. Dazu wird das Silo auf denselben Aufbau gestellt und von unten besprüht. Die farbigen Teilchen werden danach aussortiert und gezählt.

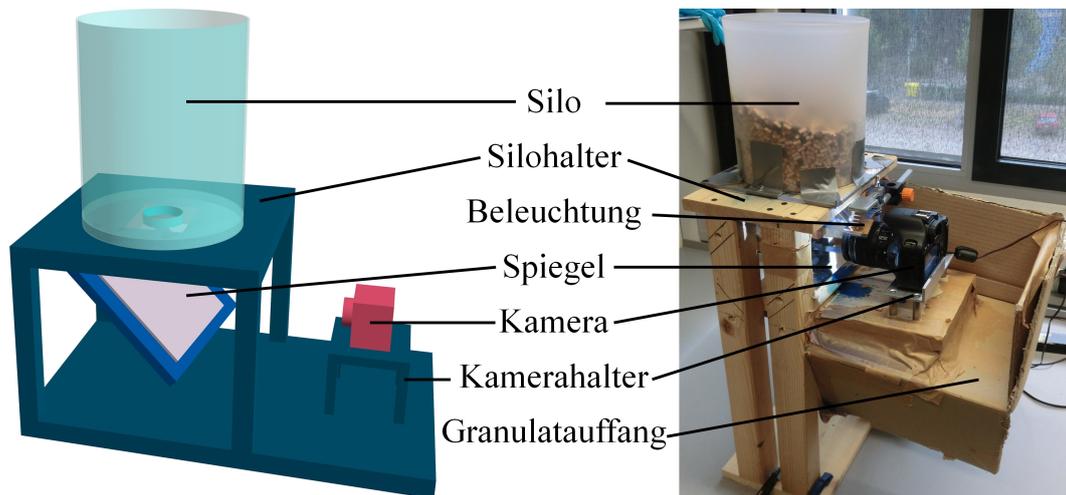


Abbildung 2.11: Zur Ermittlung der Anzahl der Teilchen in der ersten Lage am Auslass des Silos beim Verstopfen wird dieses auf einen Tisch mit einer mittigen Öffnung gestellt. Über eine Kamera Canon EOS 550D kann mittels eines Spiegels, der auf einem gekippten Halter unter der Öffnung angebracht ist, die Unterseite des Silos fotografiert werden. Die Partikel der ersten Lage können gezählt werden. Links: schematische Darstellung, rechts: Foto des Aufbaus.

3 Ergebnisse

3.1 Scherexperimente

In diesem ersten Ergebniskapitel wird auf die Ausrichtung, Packungsdichte und Oberfläche von granularem Material im Scherfluss eingegangen.

3.1.1 Ordnung und Ausrichtung oblater Granulate

Nachdem eine Analyse der Ordnung und Ausrichtung länglicher Partikel unter Scherung vorliegt, vergleiche Kapitel 1.3.2, wird hier die Ausrichtung oblater Partikel unter Scherung an Linsen mittels Computertomografie erforscht. Eine horizontale Schicht einer Aufnahme des gescherten Granulats ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Zu sehen ist ein Schnitt durch eine Schicht Linsen, 2 cm unter der freien Oberfläche. Die Kante der rotierenden Platte am Boden des Aufbaus ist orange gepunktet markiert. Es ist zu erkennen, dass in der rot eingegrenzten Scherzone (Entfernung von 17 bis 20 cm vom Drehzentrum) und nahe anliegenden Bereichen die Partikel ausgerichtet sind. Die Scherzone wird relativ schmal gewählt um Randeinflüsse ausschließen zu können. Außerdem wird so sichergestellt, dass auch bei kleinen Rotationen des inneren Bereichs der Zelle gescherte Regionen betrachtet werden. Im Inneren des Aufbaus, hier oben im Bild, liegen die Partikel zufällig verteilt.

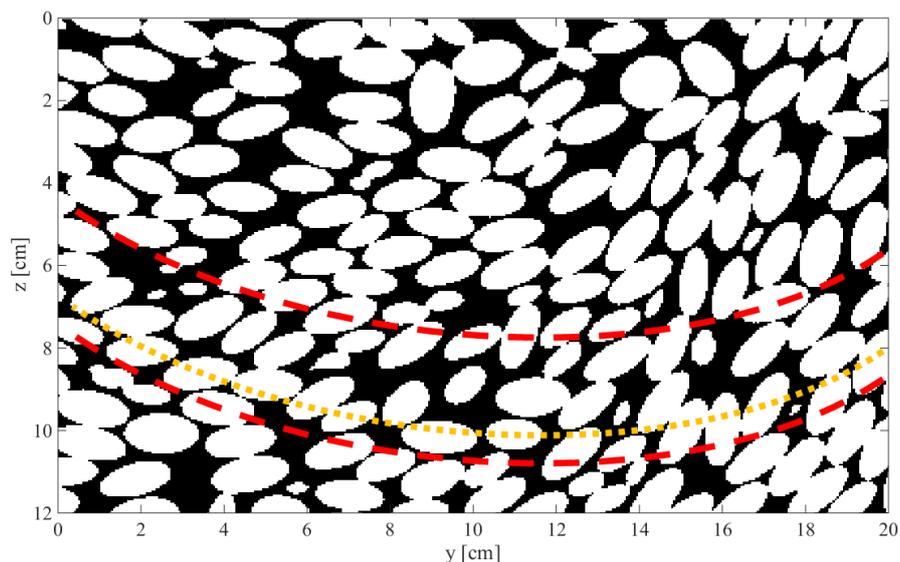


Abbildung 3.1: Tomogrammschicht parallel zum Boden des Aufbaus, 2 cm unter der freien Oberfläche. Orange gepunktet ist die Kante der rotierenden Bodenplatte und rot gestrichelt sind die Grenzen der Scherzone dargestellt. Der innere Teil des Silos wurde gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Das Drehzentrum der Zelle würde sich oberhalb der Abbildung befinden.

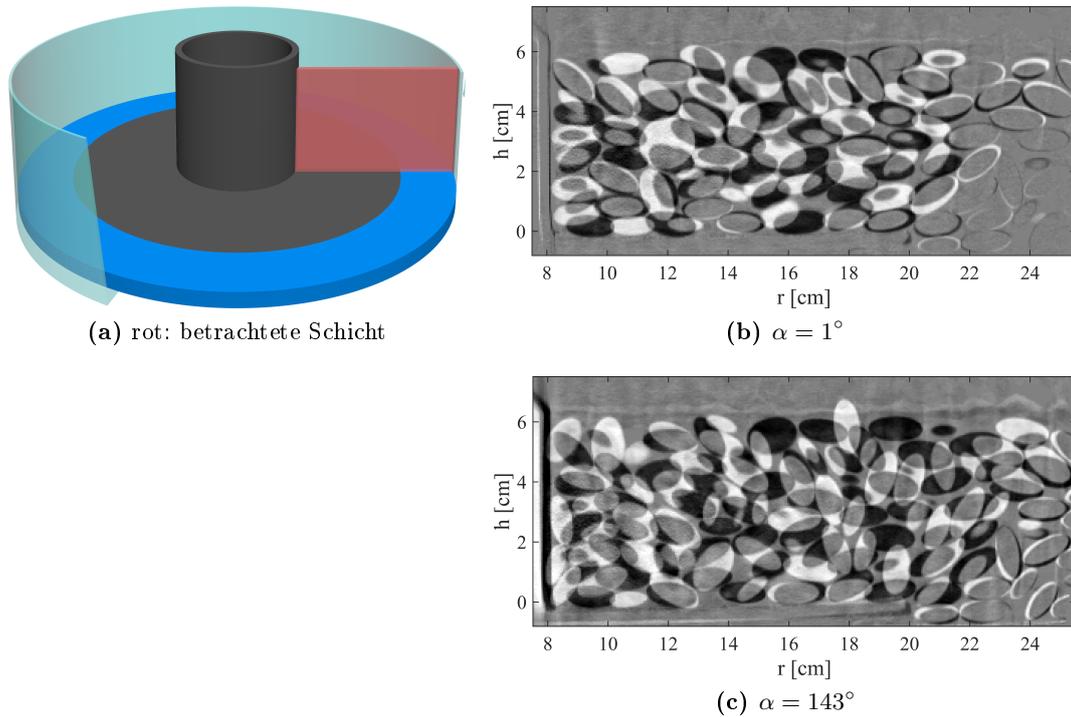


Abbildung 3.2: Differenzbild je zweier Tomogrammschnitte, Lage innerhalb der Scherzelle in (a) gekennzeichnet. Zwischen den Tomogrammen liegt eine Rotation des inneren Bereichs der Scherzelle um den Winkel α vor.

Zuerst kann betrachtet werden, welche Bereiche sich in der Scherzelle bewegen. Dies wird in Abbildung 3.2 untersucht. Hier sind jeweils Differenzbilder zweier Tomogrammschnitte dargestellt. Zwischen den Tomogrammen liegt zum einen eine Drehung von ca. 1° und zum anderen von 143° . Der innere, im Bild jeweils linke, Bereich wird komplett mitbewegt, so dass sich alle Teilchen verschieben. Der Bereich in der Mitte wird geschert. Der äußere rechte Bereich bleibt stehen. Hier ändern die Partikel ihre Position nicht. Erst nach langer Drehung ist eine kriechende Bewegung bemerkbar. Die Teilchen verschieben sich jeweils ein kleines Stück von ihrer ursprünglichen Position. An diesen Bildern ist zu erkennen, dass die Scherzone etwas breiter ist als die im Folgenden untersuchte. Die Teilchen bewegen sich mindestens bis zu einer Entfernung von 21 cm vom Drehzentrum der Zelle. Der untersuchte Bereich wird jedoch aus oben genannten Gründen etwas weiter eingeschränkt.

Aus über 180 Tomogrammen wurden die Partikeldaten einzelner Linsen analysiert. Die Ergebnisse zu Ordnung und Ausrichtung der Partikel im Material und an der Oberfläche werden in der Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Winkel θ und φ werden, wie in Abbildung 3.3 angegeben, verwendet.

Ordnung

In der Scherzone, sowohl ganzer Breite, als auch im Kern der Zone, liegt eine hohe Ordnung, wie der Ordnungsparameter $S = 0,76$ zeigt, vor. Für einen Ordnungsparameter gleich 1 würde völlige Gleichausrichtung und für 0 statistische Verteilung vorliegen. An der Oberfläche der

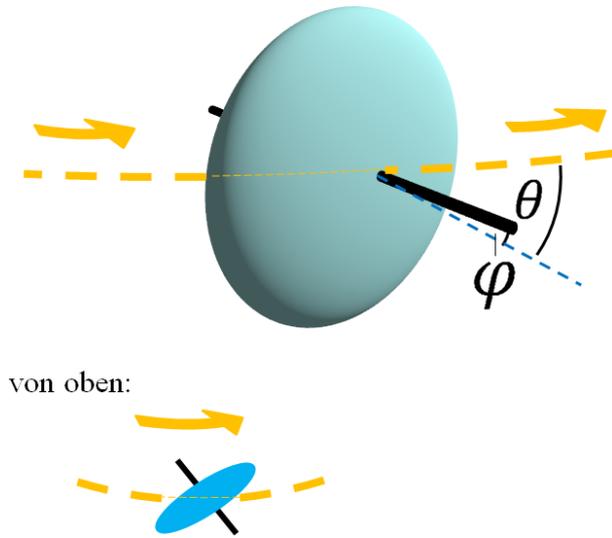


Abbildung 3.3: Winkelbezeichnung oblater Partikel. Als Achse des Teilchens, zu dem die Winkel bestimmt werden, wird die kürzeste benutzt. θ beschreibt den Winkel in horizontaler Ebene zwischen Teilchenachsenprojektion und Tangente (orange dargestellt) in Scherrichtung. Der innere Teil der Scherzelle befindet sich vom Betrachter aus gesehen hinter der Linse. Er wird gegen den Uhrzeigersinn gedreht. $\theta < 0$ bedeutet Partikel neigt sich in Scherrichtung zum Drehzentrum der Zelle. Dieser Fall ist hier zu sehen. φ beschreibt den Winkel zur vertikalen Richtung (blau). Hier zu erkennen: $\varphi > 0$. Dies bedeutet, dass die Teilchenachse nach oben geneigt ist.

Tabelle 3.1: Ergebnisse oblater Partikel unter Scherung für verschiedene Bereiche der Scherzelle. Die Partikelanzahl gibt die Menge ausgewerteter Teilchen an.

Höhe (von freier Oberfläche)	10 – 30 mm	10 – 30 mm	0 – 10 mm Oberfläche	10 – 30 mm
Zone	Scherzone	Kern der Zone	Scherzone	außerhalb
Entfernung Drehzentrum	17 – 20 mm	18 – 19 mm	17 – 20 mm	11 – 14 mm
S	$0,76 \pm 0,02$	$0,76 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,03$	$0,44 \pm 0,02 \pm 2^\circ$
D	$0,03 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,04$	$0,2 \pm 0,06$	$0,28 \pm 0,04 \pm 2^\circ$
θ_a	$-64^\circ \pm 2^\circ$	$-64^\circ \pm 2^\circ$	$-66^\circ \pm 3^\circ$	$-62^\circ \pm 2^\circ$
σ_θ	$18^\circ \pm 2^\circ$	$18^\circ \pm 2^\circ$	$27^\circ \pm 3^\circ$	$31^\circ \pm 2^\circ$
φ_a	$7^\circ \pm 2^\circ$	$8^\circ \pm 2^\circ$	$11^\circ \pm 3^\circ$	$8^\circ \pm 2^\circ$
σ_φ	$19^\circ \pm 2^\circ$	$19^\circ \pm 2^\circ$	$33^\circ \pm 3^\circ$	$35^\circ \pm 2^\circ$
Partikelanzahl	12664	4311	1680	7282

Scherzone fällt der Ordnungsparameter auf 0,53 ab. Dies ist damit zu begründen, dass sich die Partikel durch die freie Oberfläche leichter bei Stößen in alle drei Richtungen bewegen können. Dadurch zeigen dann weniger Teilchen in die Vorzugsrichtung. Zwischen Scherzone und dem inneren Zylinder fällt die Ordnung auf $S = 0,44$ ab. Es ist daher deutlich zu erkennen, dass durch die Scherung das Material stärker geordnet wird. Die Anfangsausrichtung in nicht gescherten Teilen kann durch Randeﬀekte oder die Einfüllmethode hervorgerufen werden. Der erste Umstand könnte durch eine wesentlich größere Scherzelle oder kleinere Teilchen verringert werden. Letzteres wäre jedoch nicht mit dem zur Verfügung stehenden Computertomografen auﬂösbar. Für eine gute Separation der Partikel muss die kleinste Achse dieser mindestens 5 mm betragen. Für die Bestimmung der Ordnung und der Ausrichtung in der Scherzone werden sehr viele Partikel betrachtet. Daher sind diese Werte sehr genau bestimmbar. An der Oberfläche steigen die statistischen Schwankungen, da wesentlich weniger Partikel untersucht werden können. Bei diesen großen Teilchen ist nicht eindeutig, bei welcher Höhe die freie Oberfläche festgelegt werden sollte.

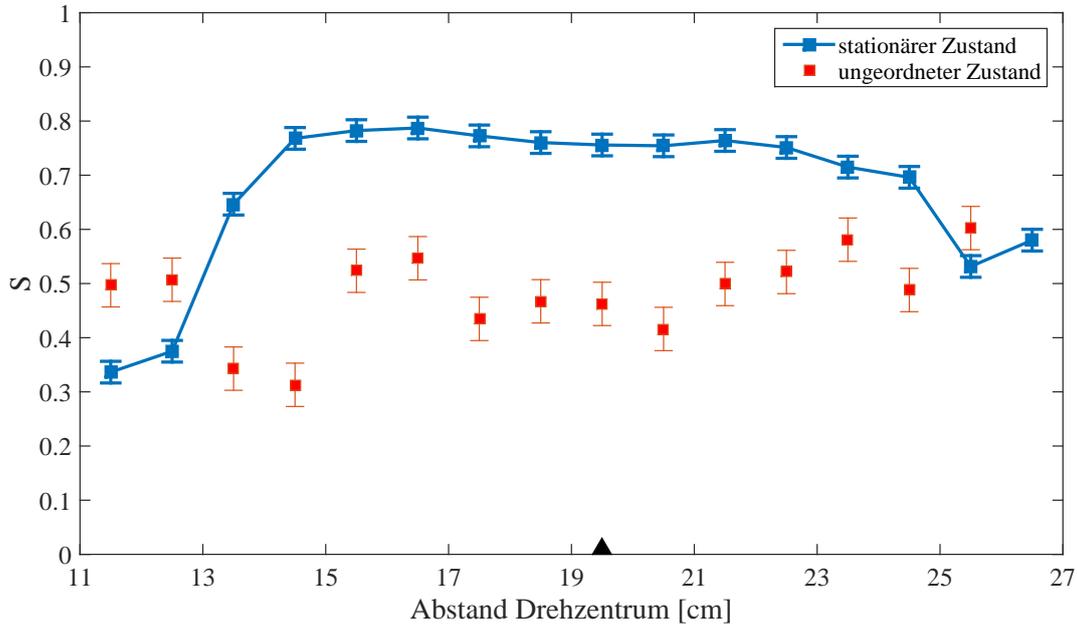


Abbildung 3.4: Ordnungsparameter in Abhängigkeit des Abstands zum Drehzentrum der Zelle für Scherung an Linsen im stationären und für einen Anfangszustand. Untersucht wurden 10 mm breite Bereiche 10 - 30 mm unter der Oberfläche. Für den stationären Zustand gehen 2000 bis 4000 und für den Anfangszustand 30 bis 40 Teilchenorientierungen in die Berechnung eines Datenpunktes ein. Das schwarze Dreieck markiert die Kante der rotierenden Platte.

Der Ordnungsparameter ist über dem Abstand zum Drehzentrum der Zelle in Abbildung 3.4 für den stationären und einen Anfangszustand aufgetragen. Im stationären Fall ist zu erkennen, dass die Ordnung zum Zellinneren und nach außen abfällt. Es liegt auch hier aus den oben genannten Gründen ein von Null verschiedener Ordnungsparameter vor. Die lokale Ausrichtung von Partikeln trägt ebenfalls zu einem von Null verschiedenen Ordnungsparameter bei. Über einen weiten mittleren Bereich liegt hohe Ordnung vor. Die Teilchen sind im Vergleich zur Scherzelle relativ groß, so dass ein breiter Bereich geordnet wird. Besonders an den Rändern des hier als Scherzone eingegrenzten Bereichs ist die Ordnung nochmals erhöht gegenüber den anderen Werten. Hier stoßen die Teilchen weniger durch die geringe Scherung und können damit gut die Vorzugsrichtung beibehalten. Die Krafteinwirkung ist dabei sehr gering, so dass die Partikel nur wenig ausgelenkt werden und dann schnell wieder eine mittlere Ausrichtung einnehmen können.

Der Anfangszustand zeigt einen um 0,5 schwankenden Ordnungsparameter. Es wird kein verschwindender Ordnungsparameter erreicht, da, wie oben beschrieben, durch das Einfüllen bzw. die Systemränder für diese vergleichsweise großen Teilchen bereits eine Ausrichtung vorliegen kann. Des Weiteren werden nur kleine Bereiche untersucht, in denen eine lokale Gleichorientierung der Partikel wahrscheinlich sind. Es ist dennoch deutlich zu sehen, dass die Scherung eine erhöhte Ordnung hervorruft. Die Teilchen minimieren die Reibung, die bei der Bewegung auftritt indem sie sich ausrichten.

Die Abhängigkeit der Ausrichtungen (Abbildung 3.7 und 3.8) von der Entfernung zum Drehzentrum werden im nächsten Abschnitt gezeigt. Im ungeordneten Zustand sind leichte Schwankungen der Winkel und breite Winkelverteilungen zu erkennen. Der Ordnungseffekt zu Beginn

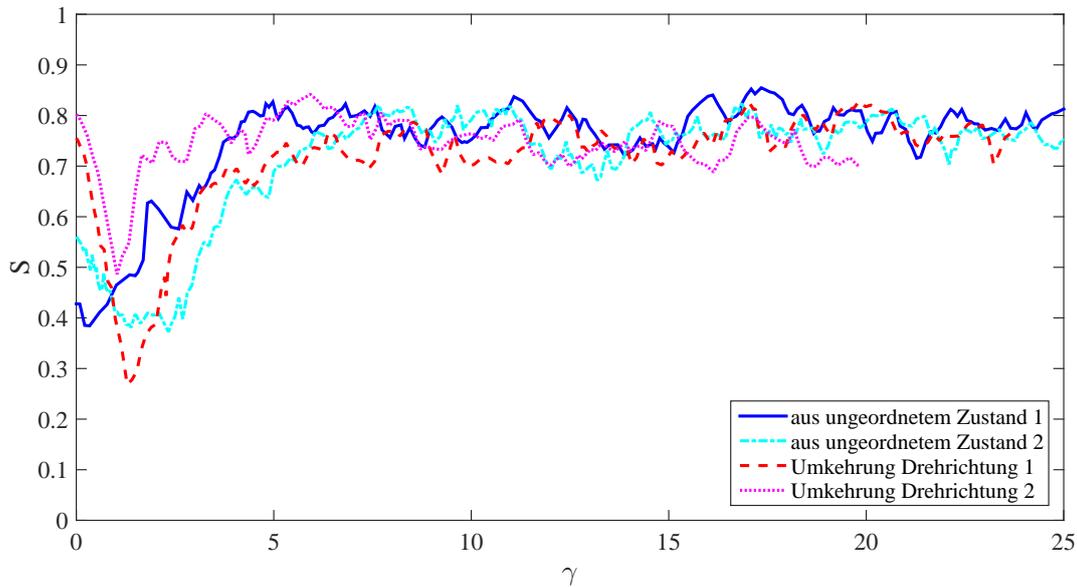


Abbildung 3.5: Abhängigkeit des Ordnungsparameters S von der Scherung für das Einlaufen in den stationären aus dem ungeordneten Zustand und bei Umkehrung der Scherrichtung. Betrachtet wird eine Höhe von 10 - 30 mm unter der Oberfläche und ein Abstand vom Drehzentrum von 17 - 20 cm. Es werden je zwei Experimente dargestellt. γ stellt die maximale Scherung gemessen in der Mitte der Scherzone dar.

der Messung sollte durch eine größere Scherzelle oder kleines Granulat vermieden werden. Letztes ist nur bedingt möglich, da die Teilchen groß genug sein müssen, um in Computertomogrammen aufgelöst werden zu können.

Des Weiteren kann der Ordnungsparameter für zwei Einlaufvorgänge in den stationären Zustand betrachtet werden. Zum einen beginnt die Untersuchung im ungeordneten Zustand und zum anderen wird die Scherrichtung in der Scherzelle umgekehrt. Beide Versuche werden je einmal wiederholt und in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Umrechnung zwischen dem Drehwinkel des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle und der Scherung befindet sich im Anhang A.2. Aus dem ungeordneten Zustand steigt der Ordnungsparameter von ca. 0,4 bis 0,5 auf den stationären Wert 0,8 an. Diese Entwicklung ist bei $\gamma \approx 4$, was einer Drehung des innen Teils der Scherzelle von ca. 55° entspricht, abgeschlossen. Bis zum stationären Zustand hat sich ein Teilchen an vier anderen vorbei bewegt. Unter Umkehr der Scherrichtung dauert der Vorgang vergleichbar lange. Hier fällt jedoch erst der Ordnungsparameter durch die Reorientierung der Teilchen auf ca. $S \approx 0,3$ bzw. 0,5. Es drehen sich also nicht alle Teilchen gleichzeitig bzw. in dieselbe Richtung. Die Verteilungsbreite des Winkels steigt an. Danach steigt der Ordnungsparameter dann wieder an, da sich die Teilchen erneut in die Vorzugsausrichtung drehen und damit die Energiedissipation minimieren.

Ausrichtung

Die mittlere Ausrichtung der Teilchen von $\theta = -64^\circ$ in der Scherzone beschreibt ein Teilchen, dass vergleichbar mit dem in Abbildung 3.3 liegt. Der Winkel entspricht dem zwischen Tangente und kurzer Achse des Teilchens. Es liegt in Scherrichtung nach innen geneigt. Die

Standardabweichung beträgt 18° . Wird dieses Teilchen von oben betrachtet, sieht es wie ein Dübel vorheriger Untersuchungen [51, 57] länglich aus. Dabei hätten die Linsen ein Aspektverhältnis von 2,2 und einen Winkel von 26° . Dieser liegt leicht erhöht über dem der Dübel Q2 mit 17° . Die Abweichung ist erklärbar durch die andere Form. Dübel sind Zylinder und Linsen Ellipsoide. In [57] ist auffällig, dass Reis, ebenfalls ellipsoid, höhere Ausrichtungswinkel als Zylinder annimmt. Die ermittelten Winkel θ liegen etwas höher als der Trend der Literatur für Granulate [50, 57] und für Flüssigkristalle [113–115]. Ellipsoide werden durch ihre Abrundungen weniger durch ihre Nachbarn in Bewegungen eingeschränkt. Des Weiteren stellen sich die Schokoladenlinsen auf, wie weiter unten beschrieben, und unterliegen so zwei verschiedenen Reibungseffekten. Zum einen versuchen die Partikel die Reibung, die durch eine Querlage zum Scherfluss entsteht, zu minimieren. Zum anderen entsteht hier im Vergleich zu Dübeln eine größere Reibung der Partikel aneinander, weil die Fläche mit der die Schokoladenlinsen aneinander liegen größer ist. Das Reibungsminimum liegt daher hier bei einem größeren Winkel als bei länglichen Teilchen.

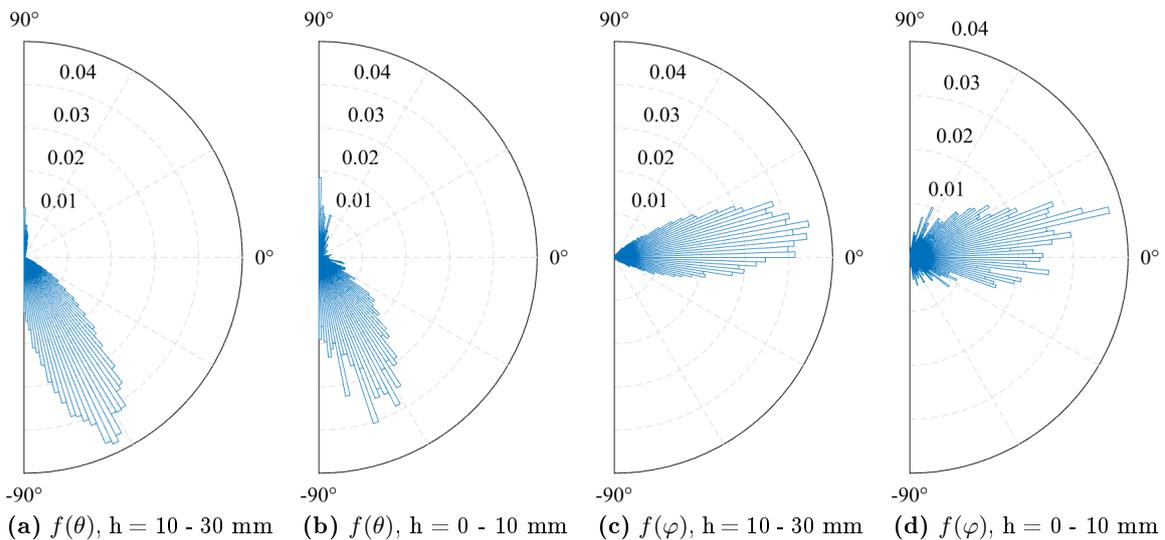


Abbildung 3.6: Winkelverteilungsfunktionen von θ und φ für Partikel der Scherzone (Abstand zum Drehzentrum: 17 - 20 cm) im Material ($h = 10 - 30$ mm) und an der Oberfläche ($h = 0 - 10$ mm) für Linsen

Aus der Horizontalen sind die Partikel im Mittel nur gering ausgelenkt. Das durchschnittliche Partikel hat sich während der Scherung aufgestellt und befindet sich nicht parallel zum Boden. Er neigt sich in Scherrichtung leicht mit der oberen Seite zur Mitte der Zelle und verläuft damit in Richtung der Scherzone, die sich ebenfalls zur Mitte der Scherzelle biegt, vergleiche Abbildung 1.5 oder 1.6. Die Standardabweichung σ_φ ist vergleichbar mit σ_θ . Dies spiegelt sich auch im geringen biaxialen Ordnungsparameter D wider. Er zeigt nur eine geringe Abweichung von Null. Die Ausrichtung in der horizontalen Ebene, beschrieben durch den Winkel θ , und in vertikaler Richtung, beschrieben durch φ , weichen ähnlich stark von der mittleren Ausrichtung ab. Dies ist ein Unterschied zur Ausrichtung von länglichen Partikeln unter Scherung. Diese zeigen einen höheren biaxialen Ordnungsparameter, da die Verteilung in der horizontalen schmaler als in der vertikalen Richtung ist. Dies kann durch die Form der Teilchen der beiden Materialtypen erklärt werden. Die Linsen werden durch das Aufstellen in

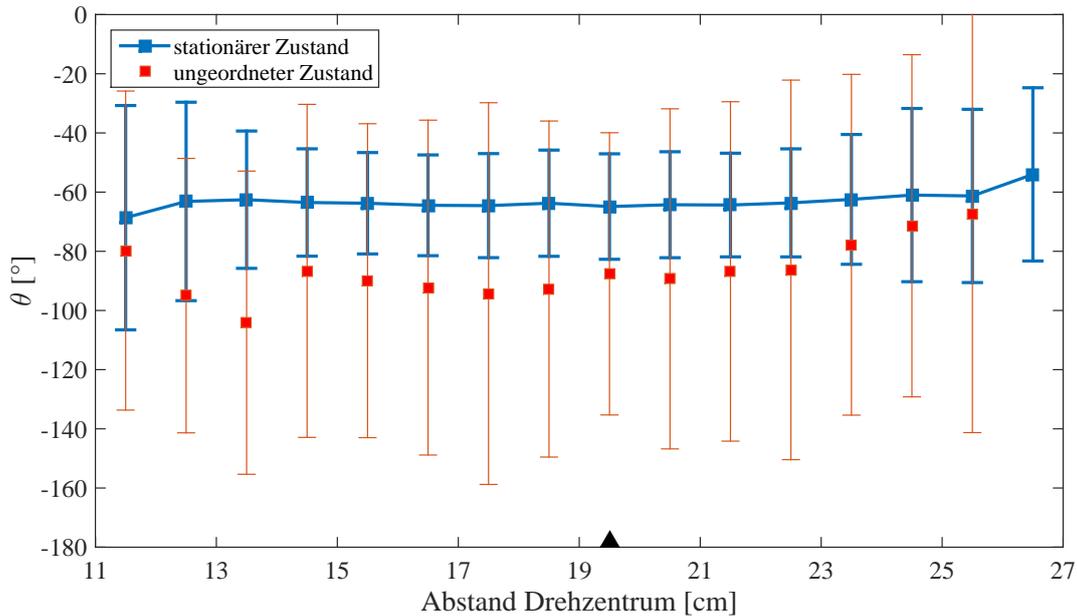


Abbildung 3.7: Winkel θ in Abhängigkeit des Abstands zum Drehzentrum der Zelle für Scherung an Linsen im stationären und für einen Anfangszustand. Untersucht wurden 10 mm breite Bereiche 10 - 30 mm unter der Oberfläche. Für den stationären Zustand gehen 2000 bis 4000 und für den Anfangszustand 30 bis 40 Teilchenorientierungen in die Berechnung eines Datenpunktes ein. Das schwarze Dreieck markiert die Kante der rotierenden Platte. In den Fehler der einzelnen Werte fließt die Standardabweichung der jeweiligen Winkelverteilung und ein abgeschätzter Detektionsfehler ein.

beiden Richtungen stabilisiert. Sie können nur mit großer Energiezufuhr zur Seite kippen und damit die Verteilung von φ verbreitern. Die länglichen Teilchen benötigen weniger Energie, die durch Stöße zugeführt werden kann, um in vertikaler Richtung ausgelenkt zu werden.

An der Oberfläche innerhalb der Scherzone liegen ähnliche Winkel vor. Die Standardabweichungen sind jedoch größer, wie auch der verringerte Ordnungsparameter S vermuten lässt. Hier ist die Standardabweichung σ_φ deutlich größer als die des anderen Winkels, weil sich die Teilchen frei nach oben bewegen können. Die Linsen werden nicht sehr stark durch die anderen in ihrer aufrecht stehenden Position fixiert und können sich leichter flach legen. Somit liegt eine breitere Winkelverteilung vor.

Außerhalb der Scherzone zeigen die Winkel θ und φ ähnliche Größen wie innerhalb. Die Standardabweichungen zeigen aber eindeutig, dass diese Ähnlichkeit nur die Mittelwerte betrifft. Die Winkel nehmen einen sehr weiten Bereich ein. Dieser ist auch größer als der an der freien Oberfläche des Granulats. Sie sind wesentlich ungeordneter, da sie nach dem Einfüllen nicht mehr bewegt werden. Die Breite der Verteilung ist für θ geringer als für φ , was einen biaxialen Ordnungsparameter D verschieden von Null hervorruft. Es ist möglich, dass die Teilchen außerhalb der Scherzone, durch die Ausrichtung innerhalb der Scherzone, durch eine kriechende Bewegung, vergleiche Abbildung 3.2 und die Erläuterungen dazu, und durch den Einfluss der inneren Wand des Containers, eine geringe Vorzugsausrichtung aufweisen.

Für die Scherzone werden die Verteilungen der Winkel für einen Bereich im Material und an der Oberfläche in Abbildung 3.6 gezeigt. Hier sind die diskutierten Trends ersichtlich. Die Verteilungen im Material sind schmäler als an der Oberfläche.

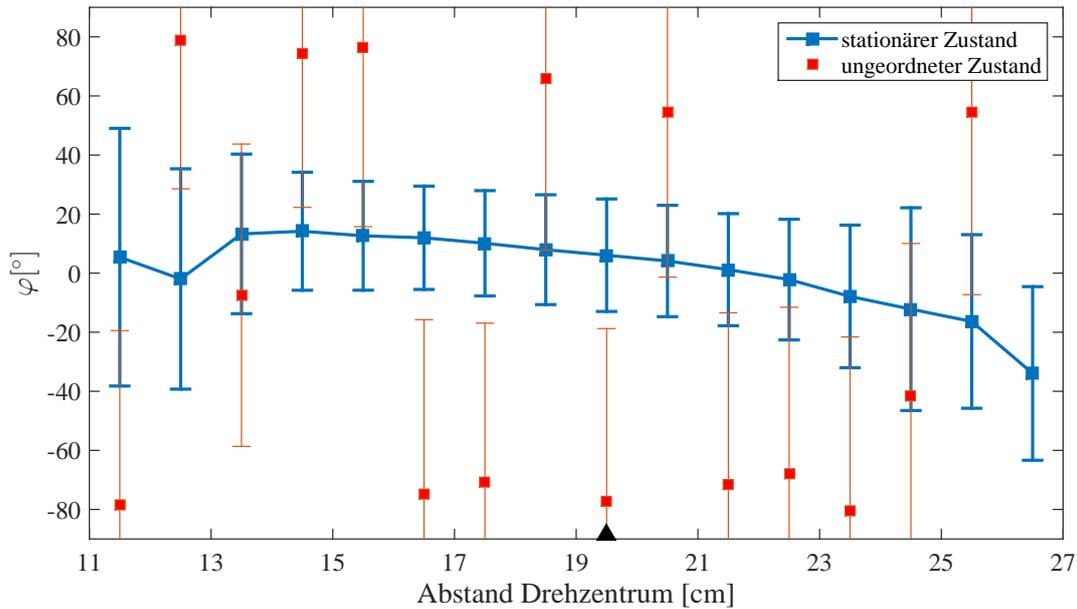


Abbildung 3.8: Winkel φ in Abhängigkeit des Abstands zum Drehzentrum der Zelle für Scherung an Linsen im stationären und für einen Anfangszustand. Untersucht wurden 10 mm breite Bereiche 10 - 30 mm unter der Oberfläche. Für den stationären Zustand gehen 2000 bis 4000 und für den Anfangszustand 30 bis 40 Teilchenorientierungen in die Berechnung eines Datenpunktes ein. Das schwarze Dreieck markiert die Kante der rotierenden Platte. In den Fehler der einzelnen Werte fließt die Standardabweichung der jeweiligen Winkelverteilung und ein abgeschätzter Detektionsfehler ein.

Des Weiteren wird die Abhängigkeit der Winkel von der Entfernung vom Drehzentrum in den Abbildungen 3.7 und 3.8 gezeigt. Es ist der stationäre Zustand und ein Anfangszustand zu sehen. Für θ zeigen sich im Anfangszustand geringe Änderungen zwischen benachbarten Punkten. Die Werte schwanken jedoch über die gesamte untersuchte Breite um knapp 40° . Es kann zur lokalen Ausrichtung kommen, die sich jedoch nicht weit ausbreitet. Des Weiteren ist die Breite der Verteilung hier sehr groß, so dass lediglich ein Mittelwert (ca. -90°) nahezu aller möglichen Winkel (0° bis -180°) zu sehen ist. Im stationären Zustand liegt fast im gesamten Untersuchungsbereich ein mittlerer Winkel von ca. -65° vor. Dieser ist tatsächlich durch die Ausrichtung der Teilchen begründet. Die Winkelverteilungen werden dabei, wie bereits gezeigt, zu den Rändern hin breiter. Der Winkel φ nimmt Werte des gesamten Winkelbereichs ein. Hier haben benachbarte Punkte oft auch ähnliche Werte. Die starken Sprünge des Verlaufs des Anfangszustands sind darstellungsbedingt. Winkel zwischen -90° und -80° entsprechen dem Bereich 90° bis 100° . Die Teilchen liegen bei einem Winkel von 90° flach. Beim Einfüllen legen sich die Schokoladenlinsen mit der untersten Schicht parallel zum Boden. Die oberen Schichten liegen dann ebenfalls annähernd parallel dazu. Durch Lücken zwischen Linsen können sich jedoch auch Teilchen aufstellen. Dadurch stellt sich in der hier gezeigten Schichthöhe 1 - 3 cm unter der Granulatoberfläche ein mittlerer Winkel, der flach liegende Teilchen mit breiter Verteilung repräsentiert, ein. Im stationären Zustand liegt in der Scherzone ein Winkel etwas größer als Null vor. Des Weiteren ist ein geringer Abfall des Winkels zum Außenrand des Schercontainers hin zu erkennen. Die Teilchen stehen hier weniger aufrecht, sondern sie sind mit der oberen Hälfte zum Containeräußeren hin gekippt. Dieser Effekt ist einfüllbedingt. Zum einen könnten sich die Teilchen parallel zum Boden, aber andererseits auch parallel zur Wand

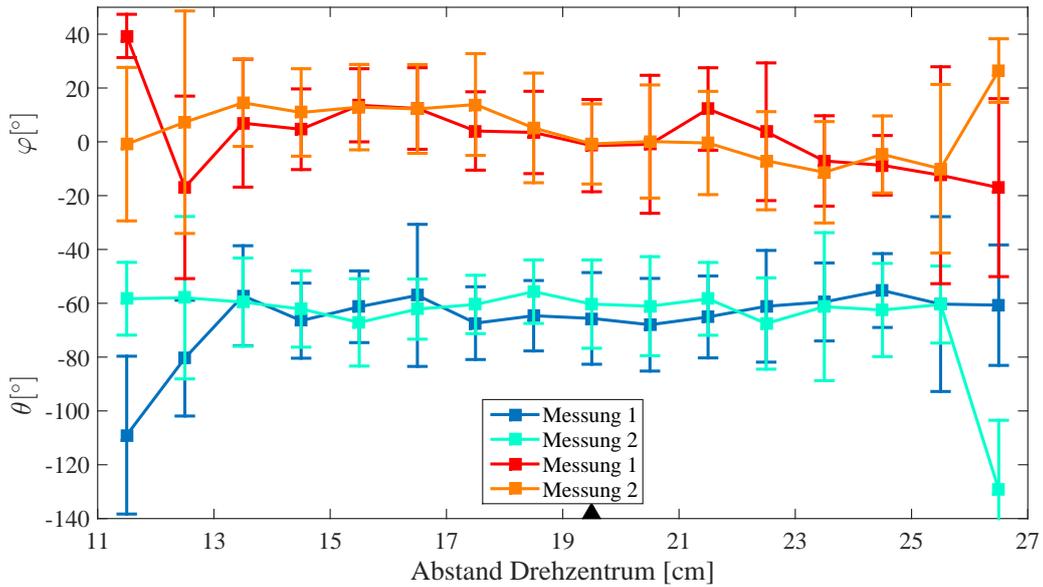


Abbildung 3.9: Winkel θ und φ in Abhängigkeit des Abstands zum Drehzentrum der Zelle für Scherung an Linsen im stationären Zustand für je nur die Daten einer Computertomografieaufnahme. Untersucht wurden 10 mm breite Bereiche 10 - 30 mm unter der Oberfläche. Es gehen ca. 30 bis 40 Teilchenorientierungen in die Berechnung eines Datenpunktes ein. Das schwarze Dreieck markiert die Kante der rotierenden Platte. In den Fehler der einzelnen Werte fließt die Standardabweichung der jeweiligen Winkelverteilung und ein abgeschätzter Detektionsfehler ein.

ausrichten.

Verschiedene Einzelmessungen, also die Auswertung der Daten nur eines Tomogramms, im stationären Zustand zeigen ähnliche Ergebnisse, wie in Abbildung 3.9 zu sehen ist. Diese Einzeldaten des stationären Zustands entsprechen den mittleren Werten, die sich aus der Auswertung aller Experimente ergeben. Im stationären Zustand tritt zwischen zwei Messungen, unabhängig von der Rotation der Scherzelle zwischen ihnen, kaum noch eine Änderung der mittleren Ausrichtung der Teilchen über weite Teile des untersuchten Gebiets auf. Lediglich an den Rändern, bei Abständen zum Drehzentrum kleiner als 14 cm und größer als 24 cm, schwanken die Werte stark. Diese Gebiete werden nicht durch die Scherzone beeinflusst.

Werden einzelne Partikel verfolgt, zeigen diese im stationären Zustand keine auffällig bevorzugten Drehrichtungen. Bei Auslenkung aus der bevorzugten Lage ($\theta_a = -64^\circ$) kehren die Teilchen, im Vergleich zu Dübeln, vergleiche [50] Abbildung 9, schnellstmöglich zurück. Würde eine Linse um 15° aus der mittleren Lage auf -79° gedreht werden, würde sie über die Winkel -75° und -70° in die mittlere Lage zurückkehren. Dies ist schematisch in Abbildung 3.10 dargestellt. Bei Dübeln mit $\theta_a = 12,8^\circ$ und einer Drehung um 15° auf $-2,2^\circ$, würde eine halbe Rotation des Teilchens folgen. Dies ist zu begründen durch die mittlere Winkellage der Teilchen. Linsen bilden einen relativ großen Winkel mit der Lage quer und parallel zum Fluss. So ist auch bei der Einstellung des Gleichgewichts aus einem ungeordneten Zustand kein besonderes Rotationsverhalten erkennbar. Es ist zu erkennen, dass zuerst höhere Winkel, um -30° , angenommen werden, bis sich bei etwa $\gamma \approx 2$ ein Gleichgewicht eingestellt hat. Dies ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Unter Änderung der Scherrichtung zeigt sich, dass beide möglichen Partikeldrehrichtungen angenommen werden. Dies ist im zeitlichen Verlauf der

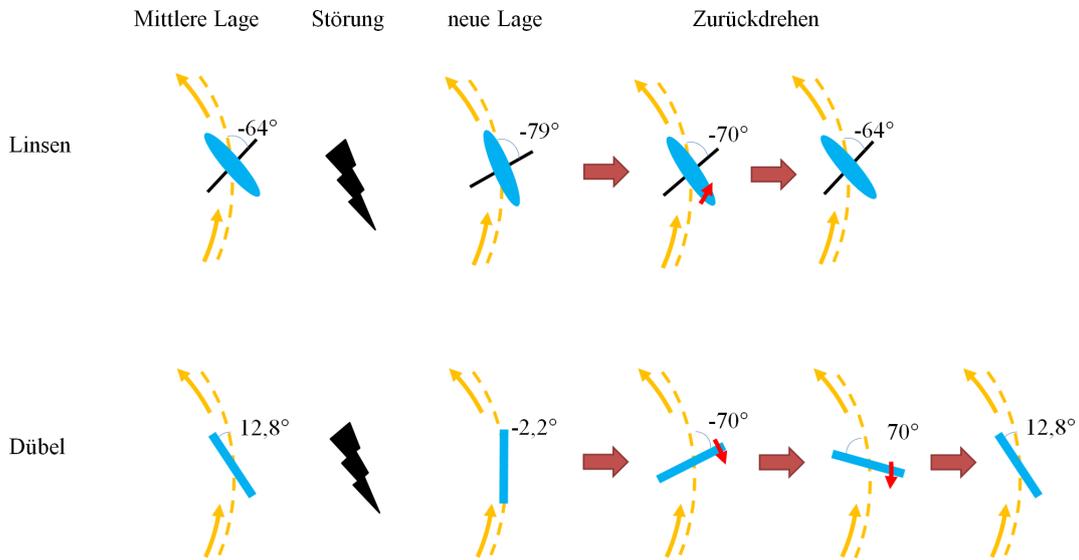


Abbildung 3.10: Vergleich der typischen Drehungen von flachen (Linsen), und länglichen Teichen (Dübel) im stationären Zustand bei kleinen Auslenkungen

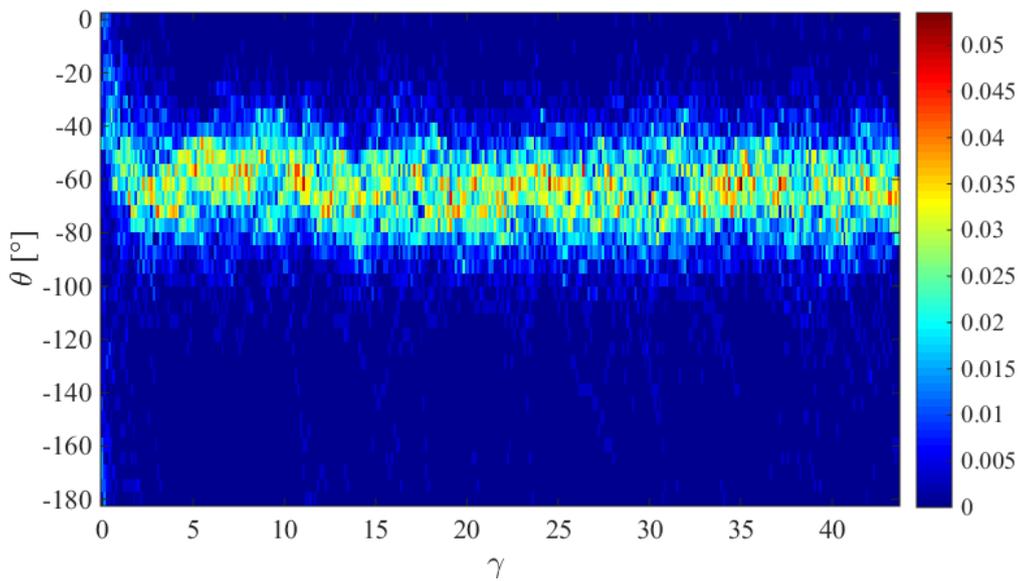


Abbildung 3.11: Abhängigkeit der Verteilung von θ von der Scherung beim Einlaufen in den stationären Zustand aus dem ungeordneten für Linsen. Der Verlauf entspricht etwa 1,7 Drehungen des inneren Teils der Scherzelle. γ stellt die maximale Scherung, gemessen in der Mitte der Scherzone dar. Die Zahlenwerte der Farbskala entsprechen der relativen Anzahl der Teilchen mit entsprechendem Winkel im betrachteten Bereich geteilt durch die Winkelintervallbreite.

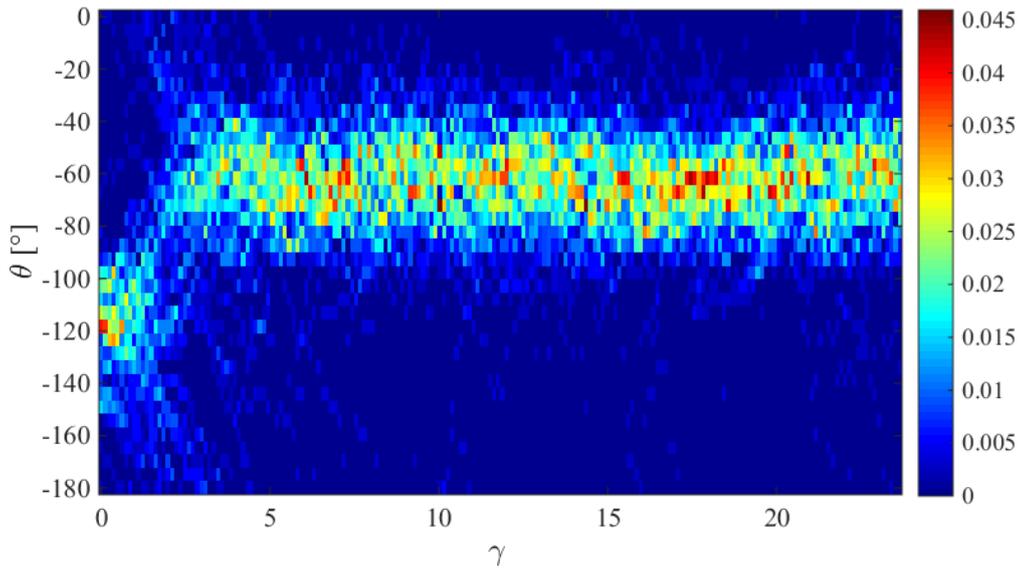


Abbildung 3.12: Abhängigkeit der Verteilung von θ von der Scherung für die Umkehrung der Rotations- bzw. Scherrichtung für Linsen. Der Verlauf entspricht etwa einer Drehung des inneren Teils der Scherzelle. γ stellt die maximale Scherung, gemessen in der Mitte der Scherzone dar. Die Zahlenwerte der Farbskala entsprechen der relativen Anzahl der Teilchen mit entsprechendem Winkel im betrachteten Bereich geteilt durch die Winkelintervallbreite.

Verteilung des Winkels θ , vergleiche Abbildung 3.12, zu erkennen. Die Teilchen lenken sich von etwa -120° zum neuen stationären Winkel von ca. -60° aus. Dabei werden beide Drehrichtungen etwa gleich häufig eingenommen. Für $\gamma \approx 2,7$ ist der stationäre Zustand erreicht. Das Experiment wurde zweimal durchgeführt. Es ergeben sich jeweils ähnliche Ergebnisse.

3.1.2 Ordnung und Ausrichtung von Granulaten mit drei verschiedenen Hauptachsen

Neben der Ausrichtung und dem Rotationsverhalten oblater Partikel wurden auch Teilchen mit drei verschiedenen Hauptachsen untersucht. Hierfür wurden Kidneybohnen verwendet. Diese haben eine lange Achse, 16,5 mm, die ca. zweimal dem größeren Durchmesser, 8,1 mm, entspricht. Die kleinste Abmessung ist nochmals 2 mm kleiner. Zuerst wird erneut betrachtet, welche Materialbereiche sich in der Scherzelle bewegen. Es ist in Abbildung 3.13 zu erkennen, dass sich wie bei Schokoladenlinsen der innere Teil der Scherzelle, durch die Drehung, verschiebt. In der Scherzone wird das Material etwas mitgenommen und am stehenden Rand bleibt auch das Granulat still. Auch hier wird die Scherzone etwas schmaler definiert als sich Teilchen mitbewegen. Diese Betrachtung wird aus den gleichen Gründen, wie für die oblaten Teilchen, vergleiche Kapitel 3.1.1, gewählt. Für größere Scherung ist hier ebenfalls im äußeren Zellenbereich eine kriechende Bewegung ausmachbar.

Außerdem kann die Ausrichtung und Ordnung der Bohnen betrachtet werden. Hierzu werden die relevanten Kennwerte für verschiedene Bereiche innerhalb der Scherzelle in Tabelle 3.2 angegeben. Es wurden 370 Experimente im stationären Zustand ausgewertet.

Die zur Beschreibung genutzten Winkel sind in Abbildung 3.14 dargestellt und erläutert. θ ist der Winkel zwischen der Projektion der längsten Partikelachse auf die horizontale Ebene und

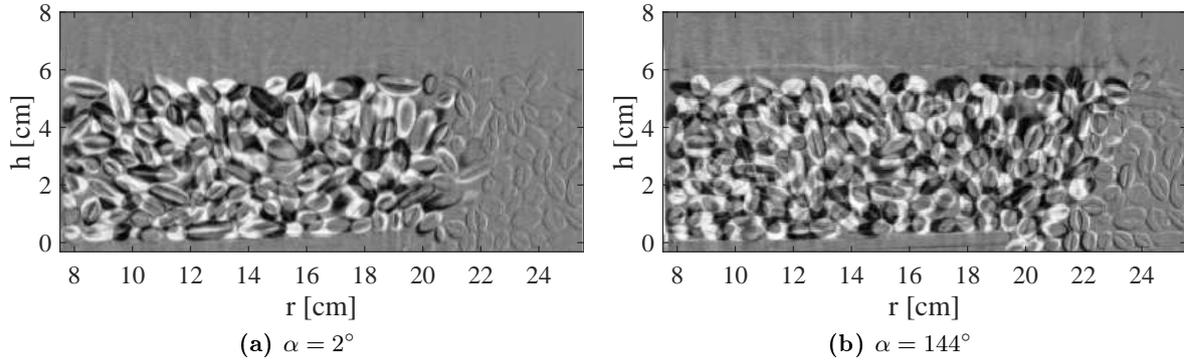


Abbildung 3.13: Differenzbild je zweier Tomogramme, Lage innerhalb der Scherzelle in Abbildung 3.2 (a) gekennzeichnet. Zwischen den Tomogrammen liegt eine Rotation des inneren Bereichs der Scherzelle um den Winkel α vor.

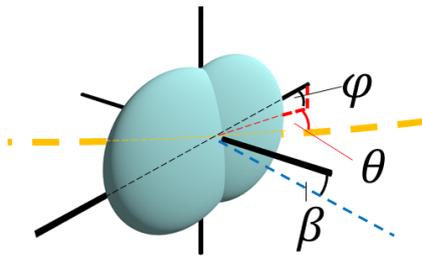


Abbildung 3.14: Winkelbezeichnung der Partikel mit drei verschiedenen Achsen, Kidneybohnen. Eine Bohne wird schematisch durch zwei überlappende Ellipsoide dargestellt. Als Achse des Teilchens zu dem zwei Winkel bestimmt werden, wird die längste benutzt. θ beschreibt den Winkel in horizontaler Ebene zwischen Teilchenachsenprojektion und Tangente (orange dargestellt) in Scherrichtung. Der innere Teil der Scherzelle befindet sich vom Betrachter aus gesehen hinter der Linse. Er wird nach rechts bewegt. $\theta > 0$ bedeutet Partikel neigt sich in Scherrichtung zum Drehzentrum der Zelle. φ beschreibt Winkel in vertikaler Richtung. $\varphi > 0$ bedeutet, dass die Teilchenachse nach oben geneigt ist. β ist der Winkel zwischen der Achse der kürzesten Abmessung der Teilchen und der horizontalen Ebene. $\beta > 0$ beschreibt Teilchen, die mit der oberen Hälfte in das Zelleninnere geneigt sind. Dieser Winkel entspricht $\varphi > 0$ für oblate Teilchen.

der Scherrichtung. φ beschreibt den Winkel zur vertikalen Achse. β ist die Verkipfung aus dem aufrechten Stand, vergleiche φ bei der Beschreibung von Linsen (Abbildung 3.3).

Ordnung

Die in Tabelle 3.2 angegebenen Ordnungsparameter S und D wurden aus je einem neunkomponentigen Ordnungstensor berechnet, in den jeweils die Ausrichtung der längsten Achse der Teilchen eingeht. Daraus wurden auch die Winkel θ_a und φ_a bestimmt. Der weitere Winkel β_a , zur Beschreibung der Verkipfung aus dem aufrechten Stand zum Zellinneren oder -äußeren, wurde aus dem Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert des Tensors ermittelt. Dieser Eigenvektor beschreibt die kürzeste Achse eines in Vorzugsrichtung weisenden Teilchens. Außerdem wurde eine Phasen-Biaxialität $D' = S_{aa}^{ZZ} - S_{bb}^{ZZ}$ ermittelt. Dazu wird zuerst mit dem zweistufigen Tensor der Ordnungsparameter $S = S_{cc}^{ZZ}$ und der biaxiale Ordnungsparameter $D = S_{cc}^{YY} - S_{cc}^{XX}$, sowie das zugehörige System aus Eigenvektoren ermittelt. Dieses Koordinatensystem wird als Basis verwendet, um die Einträge S_{aa}^{ZZ} und S_{bb}^{ZZ} , vergleiche Formel 1.6, zu berechnen. Dies entspricht nur einer Näherung, die auf Grund der einen sehr langen Teilchenachse getroffen

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Partikel mit drei verschiedenen Hauptachsen unter Scherung für verschiedene Bereiche der Scherzelle. Die Partikelanzahl gibt die Menge ausgewerteter Teilchen an. Die Ordnungsparameter S und D wurden aus Daten der längsten Teilchenachse mittels neun-komponentigem Ordnungstensor berechnet. Ordnungsparameter D' wurde aus zwei Komponenten des vierstufigen Ordnungstensors ermittelt.

Höhe (von freier Oberfläche)	10 – 30 mm	10 – 30 mm	0 – 10 mm Oberfläche	10 – 30 mm
Zone	Scherzone	Kern der Zone	Scherzone	außerhalb
Entfernung Drehzentrum	17 – 20 mm	18 – 19 mm	17 – 20 mm	11 – 14 mm
S	$0,75 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,02$	$0,67 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,02$
D	$0,12 \pm 0,04$	$0,12 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,04$	$0,10 \pm 0,04$
D'	$0,13 \pm 0,04$	$0,13 \pm 0,04$	$0,17 \pm 0,04$	$0,22 \pm 0,04$
D''	$2,05 \pm 0,08$	$2,05 \pm 0,08$	$1,88 \pm 0,08$	$0,83 \pm 0,08$
θ_a	$20^\circ \pm 2^\circ$	$20^\circ \pm 2^\circ$	$20^\circ \pm 2^\circ$	$30^\circ \pm 2^\circ$
σ_θ	$16^\circ \pm 2^\circ$	$16^\circ \pm 2^\circ$	$18^\circ \pm 2^\circ$	$39^\circ \pm 2^\circ$
φ_a	$-5^\circ \pm 2^\circ$	$-5^\circ \pm 2^\circ$	$-2^\circ \pm 2^\circ$	$-7^\circ \pm 2^\circ$
σ_φ	$22^\circ \pm 2^\circ$	$22^\circ \pm 2^\circ$	$26^\circ \pm 2^\circ$	$29^\circ \pm 2^\circ$
β_a	$9^\circ \pm 2^\circ$	$9^\circ \pm 2^\circ$	$1^\circ \pm 2^\circ$	$40^\circ \pm 2^\circ$
σ_β	$21^\circ \pm 2^\circ$	$21^\circ \pm 2^\circ$	$23^\circ \pm 2^\circ$	$39^\circ \pm 2^\circ$
Partikelanzahl	67811	22591	33975	45985

wird. Diese Achse der Partikel ist wesentlich länger als die anderen beiden, die sich in ihren Abmessungen sehr ähnlich sind und dominiert daher den Ordnungsprozess. Die Güte der Vereinfachung wird überprüft, indem die Gleichung $S_{\text{Probe}} = S_{cc}^{ZZ} + S_{bb}^{ZZ} + S_{aa}^{ZZ} = 0$ kontrolliert wird. Es zeigt sich bei den berechneten Werten ein Maximalwert von $S_{\text{Probe}} = 0,006$, was weit unter dem abgeschätzten Fehler liegt. Außerdem wird die beschriebene Näherung verwendet, um die Summanden von $D'' = (S_{aa}^{XX} - S_{aa}^{YY}) - (S_{bb}^{XX} - S_{bb}^{YY})$ zu berechnen. Mit den Gleichungen $S_{\text{Probe}2} = S_{cc}^{XX} + S_{bb}^{XX} + S_{aa}^{XX} = 0$ und $S_{\text{Probe}3} = S_{cc}^{YY} + S_{bb}^{YY} + S_{aa}^{YY} = 0$ wird erneut überprüft ob die Vereinfachungen gerechtfertigt sind. Es ergibt sich ein maximaler Wert von $S_{\text{Probe}3} = 0,005$. Tritt hohe Ordnung auf, streben die Parameter gegen die folgenden Werte: $S \rightarrow 1$, $D \rightarrow 0$, $D' \rightarrow 0$, $D'' \rightarrow 3$ [61].

Der Ordnungsparameter S liegt in der Scherzone im Material bei 0,75 und nimmt im Kern der Zone einen ähnlichen Wert an. Für viele Teilchen weisen die längsten Partikelachsen eine ähnliche Ausrichtung auf. An der Oberfläche der Zelle fällt der Ordnungsparameter deutlich auf 0,67 ab. Dies ist durch die freieren Bewegungsmöglichkeiten der Teilchen begründbar. Bei Stößen können sie sich beispielsweise nach oben wegdrehen. Dies ist im Material nur bedingt möglich, weil dann auch andere Partikel bewegt werden müssen, wozu eine größere Kraft nötig wäre. Außerhalb der Scherzone fällt der Ordnungsparameter auf 0,41 ab. Hier liegt eine gewisse Ordnung durch Randeinflüsse vor. Diese sind hier geringfügig kleiner als bei Linsen, weil die Bohnen kleiner sind und somit effektiv weiter von den Wänden der Zelle entfernt.

Der Ordnungsparameter von Bohnen liegt deutlich über dem von Dübeln mit Aspektverhältnis $Q = 2$, mit $S = 0,27$ [51]. Er ist vergleichbar mit dem Ordnungsparameter der Dübel mit $Q = 3,3$. Dieser liegt bei $S = 0,72$ [51]. Die Bohnen weisen je nach verwendeter kurzer Achse ein Aspektverhältnis von 2,04 bzw. 2,75 auf. Sie liegen demzufolge mittig zwischen den

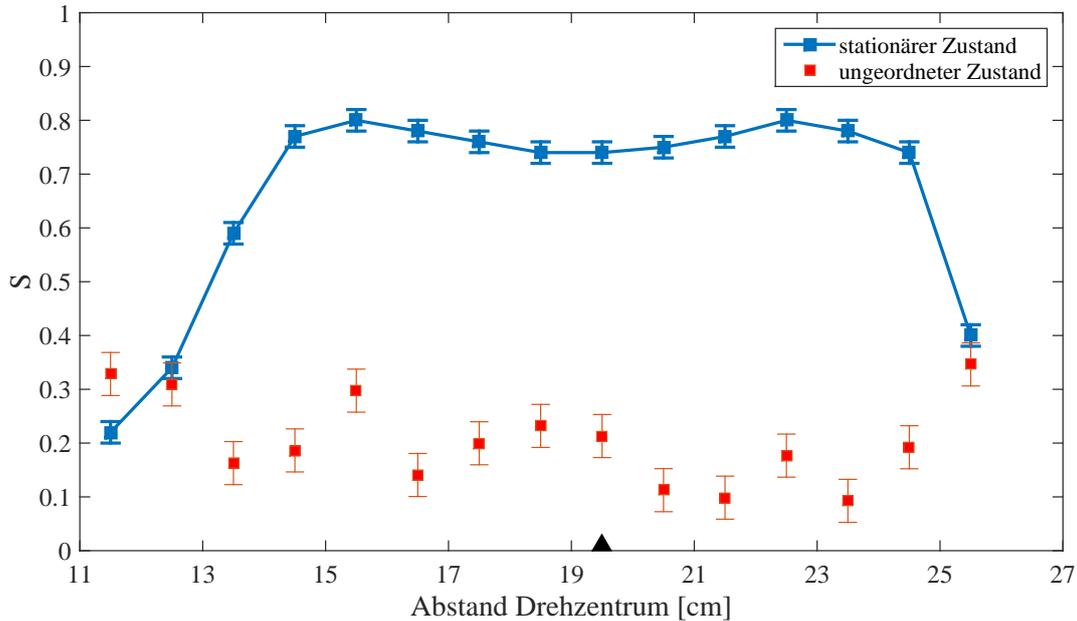


Abbildung 3.15: Ordnungsparameter in Abhängigkeit des Abstands zum Drehzentrum der Zelle für Scherung an Bohnen im stationären und für einen Anfangszustand. Untersucht wurden 10 mm breite Bereiche 10 - 30 mm unter der Oberfläche. Für den stationären Zustand gehen 3000 bis 4000 und für den Anfangszustand 40 bis 50 Teilchenorientierungen in die Berechnung eines Datenpunktes ein. Das schwarze Dreieck markiert die Kante der rotierenden Platte.

beiden Dübelarten. Die höhere Ordnung ist durch die unterschiedliche Form begründbar. Die Bohnen sind abgerundet, die Dübel vergleichsweise eckig. Zum anderen sind die Bohnen flach und stellen sich im Scherfluss auf, so dass sie dann von den umgebenden Partikeln stärker fixiert werden. Dadurch wäre eine höhere Energiezufuhr zum Auslenken aus der mittleren Position nötig. Außerdem tritt für die kleineren Dübel ein anderer Effekt auf. Sie zeigen zwei bevorzugte Lagen im Scherfluss und damit eine geringere Ordnung [58]. Die Mittelwerte sind hier, sowohl im Granulatbett, als auch an der Oberfläche des Materials, sehr gut durch die hohe Partikelanzahl und die große Entfernung zu den Systemrändern bestimmbar. Eine Verfälschung der Ergebnisse liegt nur nahe der Ränder und im ungescherten Bereich durch das Einfüllen vor.

Wird der Ordnungsparameter über dem Abstand zum Zellinneren, vergleiche Abbildung 3.15, aufgetragen, ist zu erkennen, dass er für den stationären Zustand, weit entfernt vom gescherten Bereich stark abfällt. Er sinkt nicht auf 0, da durch das Einfüllen und durch Randeffekte eine gewisse Ordnung vorliegt. An den Rändern der Scherzone ist S am größten. Die Partikel drehen sich in den Scherfluss um die Reibung zu minimieren. Die Ordnung sinkt gering zur Mitte der Zone hin ab, da hier die größten Bewegungen stattfinden und Teilchen durch Stöße mit anderen am leichtesten und weit aus der Vorzugsausrichtung herausgedreht werden können.

Der Anfangszustand zeigt ebenfalls eine geringe Ordnung, da wie oben beschrieben Ordnung durch Einfüllen und Systemränder hervorgerufen wird. Des Weiteren werden nur kleine Bereiche eines Experiments betrachtet, so dass eine lokale Ordnung ebenfalls in einem nicht verschwindenden Ordnungsparameter resultiert. Der Ordnungsparameter ist hier kleiner als bei Linsen, da die Teilchen kleiner sind und damit die Randeffekte nicht so stark.

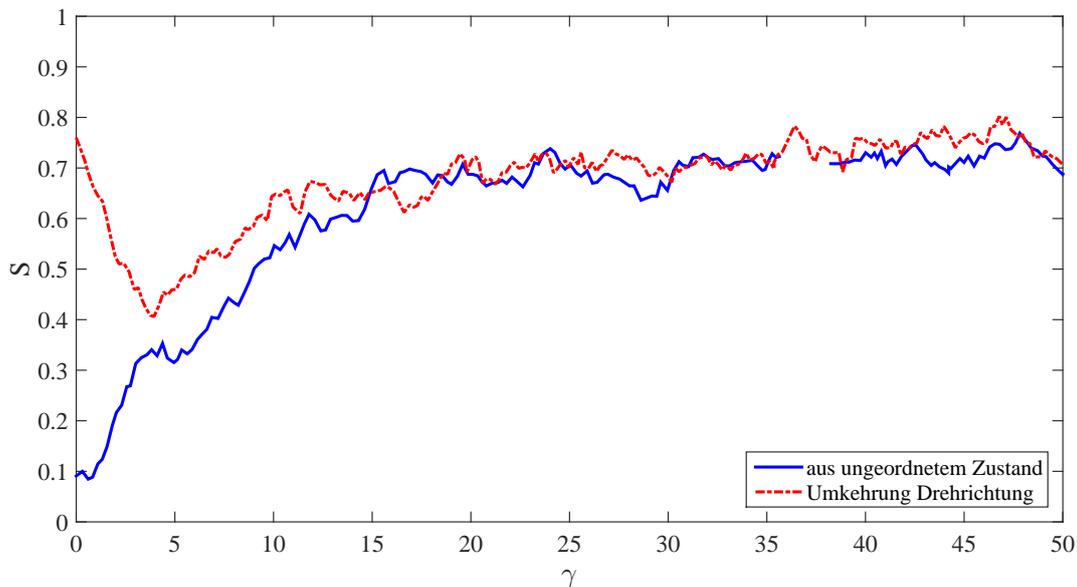


Abbildung 3.16: Abhängigkeit des Ordnungsparameters S von der Scherung für das Einlaufen in den stationären Zustand aus dem ungeordneten und bei Umkehrung der Scherrichtung. Betrachtet wird eine Höhe von 10 - 30 mm unter der Oberfläche und ein Abstand vom Drehzentrum von 17 - 20 cm. γ stellt die maximale Scherung gemessen in der Mitte der Scherzone dar.

Des Weiteren kann der Ordnungsparameter für das Einlaufen in den stationären Zustand untersucht werden. Hierfür wurde ein Experiment aus dem ungeordneten Zustand und ein weiteres unter Umkehrung der Scherrichtung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.16 dargestellt. Die Umrechnung zwischen dem Drehwinkel des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle und der Scherung befindet sich in Anhang A.2.

Eine konstant hohe Ordnung wird bei $\gamma \approx 11$ für das Einlaufen aus dem ungeordneten Zustand und bei $\gamma \approx 9$ für die Rotationsumkehr erreicht. Dies entspricht einer Drehung des inneren Teils der Scherzelle von ca. 70° . Für Bohnen tritt der stationäre Zustand etwas später als für Schokoladenlinsen und Dübel ein. Die Bohnen haben dabei mehr Partikel passiert. Sie unterliegen mehreren Ausrichtungsprozessen, da sie sich mit ihrer langen Achse der Flussrichtung annähern und sich aufstellen, sich also so drehen, dass ihre kürzeste Achse nahezu waagrecht verläuft. Für die anderen beiden Materialtypen ist je nur einer dieser Ordnungsprozesse nötig. Sie ordnen sich daher schneller.

Die Ungenauigkeit der Bestimmung von γ ist für Bohnen größer, da weniger Partikel im Material detektiert werden und somit nicht durchgehend verfolgt werden können.

Der biaxiale Ordnungsparameter D liegt für alle untersuchten Bereiche bei 0,1 bis 0,16. Diese Werte sind hoch, verglichen mit dem maximal möglichen Wert von D , 1- S für $S > 0,5$, bzw. S für $S < 0,5$, vergleiche Anhang A.3. Im Granulatbett der Scherzone könnte D maximal 0,25 und an der Oberfläche 0,33 werden. Damit liegt D für beide Bereiche etwa bei der Hälfte des Maximalwerts. Die Bohnen zeigen eine wesentlich breitere Verteilung in vertikaler, als in horizontaler Richtung. Eine Drehung in horizontaler Ebene ist schwer möglich, da die Teilchen aufgestellt sind und schnell von Nachbarpartikeln zurück gedrückt werden. Die Enden der Bohnen können hingegen wesentlich besser durch Stöße nach oben und unten ausgelenkt werden. Außerhalb der Scherzone liegt D etwa bei einem Viertel des Maximalwerts. Hier unterscheiden

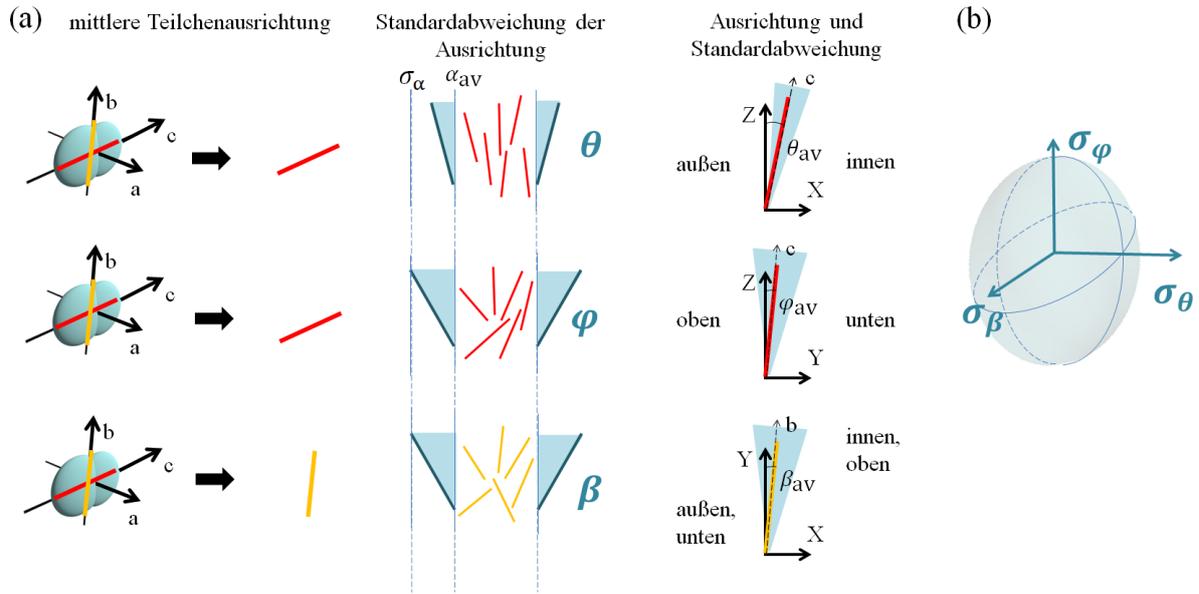


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung der Ausrichtungen und Winkelverteilungen bei Partikeln mit drei unterschiedlichen Hauptachsen. (a) Teilchen werden vereinfacht als Strich dargestellt, um die in die verschiedenen Richtungen unterschiedlichen Standardabweichungen zu verdeutlichen. Ihre mittlere Ausrichtung wird gezeigt. Dabei verlaufen a, b, c entlang der mittleren Teilchenachsen. (b) Winkelverteilungen können als Ellipsoid dargestellt werden, dabei sind zwei Achsen etwa gleichlang und länger als die dritte Achse (σ_θ).

sich die Verteilungen nur noch gering voneinander, da keine Vorzugsorientierung vorliegt, die eine geringere Verteilungsbreite in eine Richtung erklären könnte.

Es liegen für die unterschiedlichen Achsen der Bohnen unterschiedliche Winkelverteilungen vor. Diese sind schematisch in Abbildung 3.17 dargestellt. Hier wird je die Größe der Winkelverteilungen als Achse eines Ellipsoids dargestellt. Es ergibt sich in etwa die Form einer Linse. Da in Tangential- und Horizontalrichtung unterschiedliche Standardabweichungen der Winkel vorliegen, ergibt sich ein von Null verschiedener biaxialer Ordnungsparameter.

Der Ordnungsparameter der Phasen-Biaxialität D' weist ähnliche Werte wie D auf. Dieser Parameter beschreibt den Unterschied der Ordnung der teilchenfesten a- und b-Achse (die beiden kurzen Teilchenachsen) in Bezug auf die laborfeste Z-Achse. Die Bohnen stellen sich auf. Ihre zweitlängste Achse tendiert eher zu einer vertikalen als zu einer horizontalen Ausrichtung. Der vierte Ordnungsparameter D'' liegt in der Scherzone um 2. Dieser zeigt den Unterschied der Ordnung der Teilchenachsen a und b in Bezug auf die laborfeste X- und Y-Achse.

Im ungescherten Teil des Granulats fällt die Ordnung von D'' auf 0,83 ab. Dies liegt im Trend von zwei der anderen Ordnungsparameter. Nur D' zeigt einen leicht höheren Wert als in der Scherzone. Die Steigerung liegt jedoch im Bereich des abgeschätzten Messfehlers.

Ausrichtung

Der mittlere Winkel zwischen längster Teilchenachse und Scherrichtung beträgt an unterschiedlichen Stellen des gescherten Bereichs je ca. 20° . Wird dies mit Zylindern bzw. Reis, siehe Abbildung 1.7 [57], verglichen, zeigt sich, dass die Bohnen ein Aspektverhältnis von ca. 1,5 bis 2 aufweisen sollten. Dies ist nicht völlig gegeben. Es beträgt je nach betrachteter

Achse 2,04 bzw. 2,75. Des Weiteren würde sich bei dem bestimmten Ordnungsparameter ein geringerer Winkel einstellen. Dies wurde für bisher untersuchte Granulate und Flüssigkristalle [57,113–115] festgestellt. Wie bei Schokoladenlinsen ruft hier die platte Form einen größeren Winkel als erwartet hervor. Die Teilchen drehen sich nicht weiter zu einem kleineren Winkel, da sie dort zu Nachbarpartikeln eine größere Reibfläche aufweisen. Die Gesamtreibung, die sich hier aus zwei Anteilen zusammensetzt, wird minimiert. Zum einen ist die Dissipation für Teilchen, die quer zum Fluss stehen hoch, zum anderen für Teilchen die eine große Fläche mit ihnen Nachbarpartikeln teilen. Es stellt sich damit ein höherer mittlerer Winkel ein. Es kann der folgende Zusammenhang angenommen werden: Umso höher ein aufgestelltes Partikel ist, desto stärker wird der Einfluss der Reibung seiner Seitenfläche und umso größer wird der Winkel zum Scherfluss. Dies wäre an anderen flachen Teilchen zu überprüfen.

Die Standardabweichung steigt für θ von 16° zur Oberfläche auf 18° an. Hier können sich die Teilchen freier bewegen. Im ungescherten Gebiet ist sie etwa doppelt so groß.

Die Bohnen zeigen nur eine geringe Auslenkung nach unten in Scherrichtung. Ihre Verteilung in diese Richtung ist breiter als in die zuvor diskutierte.

Außerdem kann für diese Teilchen ein dritter Winkel bestimmt werden. Dieser gibt an, ob die obere Hälfte der Teilchen im Mittel leicht zum Zelläußeren oder -inneren geneigt ist. Die Verteilung dieses Winkels ist vergleichbar mit der von φ . Das durchschnittliche Partikel zeigt dabei mit der oberen Hälfte in das Innere der Scherzelle. Es verläuft damit, wie Linsen, in Richtung der Scherzone, die sich ebenfalls zur Mitte der Scherzelle biegt.

Die Verteilungen der drei Winkel in der Scherzone an der Oberfläche und im Material sind in Abbildung 3.18 dargestellt. Wie oben bereits erwähnt, sind die Verteilungen an der Oberfläche breiter als im Material. Außerdem sind sie für den Winkel, der die horizontale Ausrichtung beschreibt, kleiner.

Die Verteilungen des Winkels θ wurde für das Einlaufen in den stationären Zustand aus einem ungeordneten Zustand und unter Änderung der Scherrichtung bestimmt. Die Verläufe werden in den Abbildungen 3.19 und 3.20 gezeigt.

In der ersten Abbildung tritt bei $\gamma \approx 35$ ein Fehler auf, der darauf beruht, dass für 10 Tomogramme nur ca. ein Zehntel der sonst üblichen 150 bis 200 Partikel je Aufnahme gefunden wurde. Die Tomogramme weisen Artefakte auf. Auf den einzelnen Tomogrammschnitten sind Linien zu erkennen. Diese erschweren die Detektion erheblich. Die Verteilung ist in diesem Bereich nicht aussagekräftig. Es ist anzunehmen, dass hier Winkelverteilungen wie im Rest des stationären Zustands vorliegen.

Die Winkel sind im ungeordneten Zustand etwa gleichverteilt. Viele Partikel drehen sich dann über hohe Winkel, wie 40° , also über die Seite, die zum Zellinneren zeigt, in den stationären Zustand. Dieser ist bei $\gamma \approx 10$ und damit etwa gleichzeitig mit der erhöhten Ordnung erreicht. Für Zylinder stellt sich die hohe Ordnung eher als die Endausrichtung ein [58]. Die Bohnen müssen außer der Ausrichtung in der Horizontalen noch einen anderen Ausrichtungsprozess, das Aufstellen der Partikel, durchlaufen, daher verlangsamt sich der Ordnungsprozess.

Für die Umkehr der Drehrichtung des Inneren der Zelle, siehe Abbildung 3.20, ist zu beobachten, dass beide Einstellmöglichkeiten, über den Winkelnulldurchgang (über $0^\circ \rightarrow 20^\circ$) und die längere Rotation um ca. 140° (über $-40^\circ \rightarrow -70^\circ \rightarrow 80^\circ \rightarrow 50^\circ \rightarrow 20^\circ$), genutzt werden. Viele Partikel bevorzugen dabei die Winkeländerung von ca. 40° . Beide Winkelverteilungen der Einlaufvorgänge sind denen von Dübeln [58] sehr ähnlich, was durch die längliche Form beider Partikelsorten begründet ist.

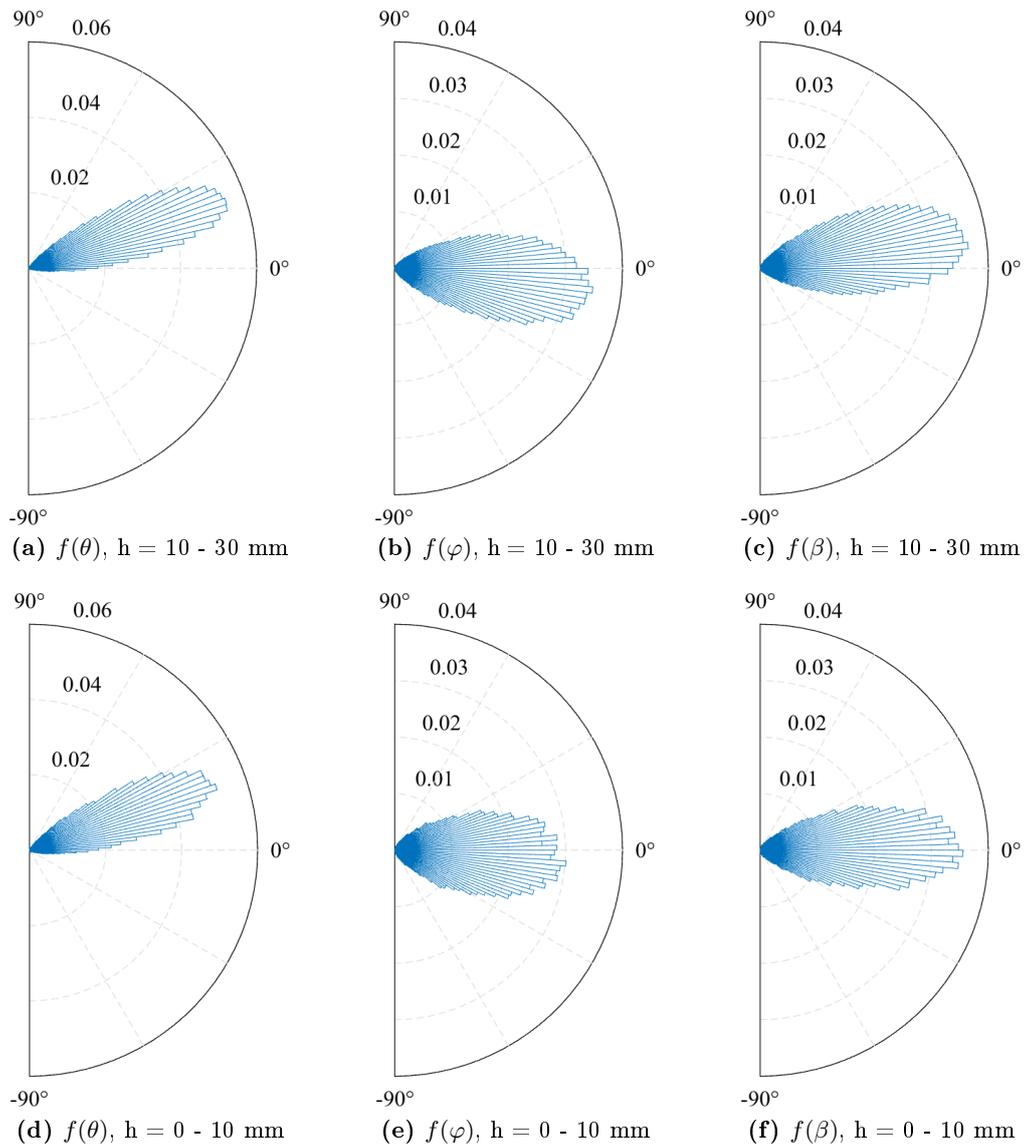


Abbildung 3.18: Winkelverteilungsfunktionen von θ , φ und β für Partikel der Scherzone (Abstand zum Drehzentrum: 17 - 20 cm) im Material ($h = 10 - 30$ mm) und an der Oberfläche ($h = 0 - 10$ mm) für Bohnen

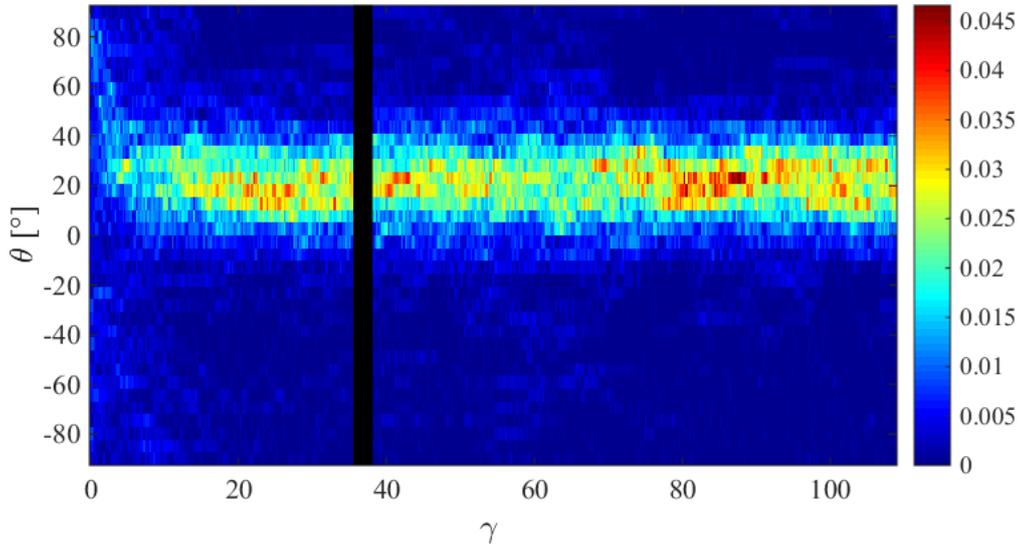


Abbildung 3.19: Abhängigkeit der Verteilung von θ von der Scherung für das Einlaufen in den stationären Zustand aus dem ungeordneten für Bohnen. Der Verlauf entspricht knapp zwei Drehungen des inneren Teils der Scherzelle. γ stellt die maximale Scherung, gemessen in der Mitte der Scherzone dar. Bei $\gamma \approx 35$ tritt ein Fehler auf, da für 10 Tomogramme nur ca. ein Zehntel der sonst üblichen 150 bis 200 Partikel je Aufnahme gefunden wurde. Die Verteilung ist in diesem Bereich nicht aussagekräftig. Die Zahlenwerte der Farbskala entsprechen der relativen Anzahl der Teilchen mit entsprechendem Winkel im betrachteten Bereich geteilt durch die Winkelintervallbreite.

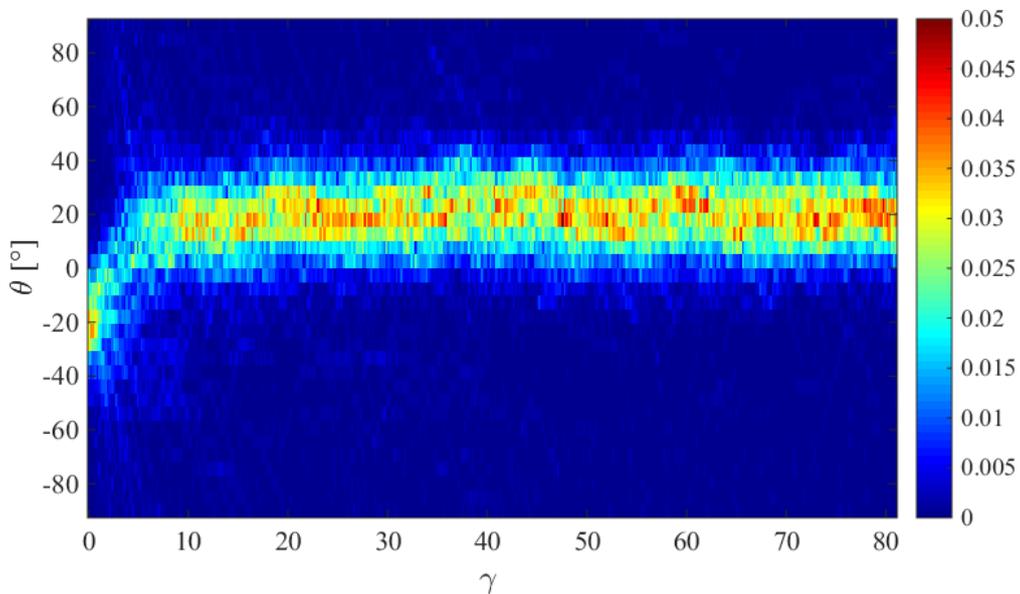


Abbildung 3.20: Abhängigkeit der Verteilung von θ von der Scherung für das Einlaufen nach Umkehr der Scherrichtung für Bohnen. Der Verlauf entspricht etwa 1,8 Drehungen des inneren Teils der Scherzelle. γ stellt die maximale Scherung, gemessen in der Mitte der Scherzone dar. Die Zahlenwerte der Farbskala entsprechen der relativen Anzahl der Teilchen mit entsprechendem Winkel im betrachteten Bereich geteilt durch die Winkelintervallbreite.

3.1.3 Packungsdichten

Die lokalen Packungsdichten, das Volumen des granularen Materials geteilt durch das betrachtete Volumen des Granulatbetts, der beiden bereits auf Ausrichtung untersuchten Materialien sind in Abbildung 3.21 dargestellt. Des Weiteren werden die Dichten für zwei verschiedene kugelförmige Granulate, Erbsen und Soft-Ball-Munition, gezeigt. Erbsen weisen eine geringe Größenvariation zwischen den Teilchen, aber auch in verschiedenen Richtungen eines Teilchens, auf. Die Soft-Ball-Munition stellt perfekte Kugeln, die alle gleichgroß sind, dar. Zum Vergleich mit Zylindern wird ebenfalls die Packungsdichte von Dübeln mit Aspektverhältnis 2 [51] gezeigt. Diese Stäbchen haben ähnliche Abmessungen wie die Bohnen.

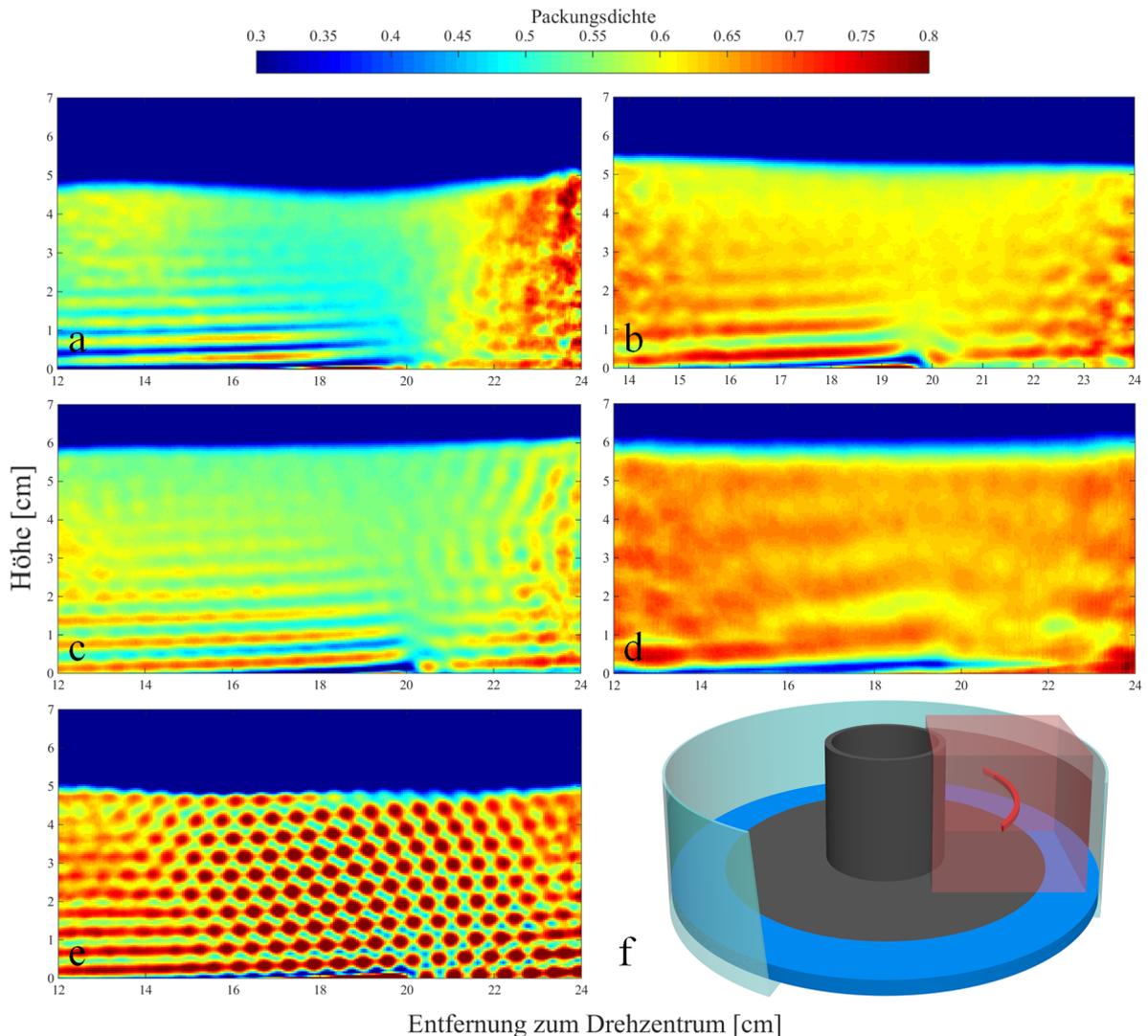


Abbildung 3.21: Lokale Packungsdichten innerhalber der Scherzelle für verschiedene Materialien (a) Dübel Q2, (b) Kidneybohnen, (c) Erbsen, (d) Schokoladenlinsen und (e) Soft-Ball-Munition. (f) verdeutlicht welcher Bereich (rote gekrümmte Linie) für einen Packungsdichtepixel innerhalber der Scherzelle gemittelt wurde. Rot durchsichtig ist der mittels CT aufgenommene Teil der Scherzelle dargestellt.

Die angegebenen Bilder stellen relative Packungsdichten dar. Diese sind quantitativ gut, aber absolute Packungsdichten können aus den folgenden systematischen Fehlern nicht ermittelt werden. Zum einen entspricht die Anfangsdichte nicht völlig der einer zufälligen Packung, da Ordnungserscheinungen durch die Ränder des Systems auftreten. Außerdem kann kein Einfüllen, das völlig unausgerichtete Teilchen hinterlässt, erfolgen, vergleiche [24]. Des Weiteren wird ein geringer Fehler bei der Wahl des Schwarz-Weiß-Schwellwerts auftreten. Dadurch können leicht zu kleine oder zu große Packungsdichten errechnet werden.

Dilatanz

Für die ersten vier Materialien ist zu erkennen, dass sich eine Dilatationszone, die etwas größer als die Scherzone ist, ausbildet. Das letzte Material, perfekte Kugeln unterschieden sich deutlich im Verhalten von den anderen. In der Dilatationszone sinkt die Packungsdichte um etwa 5 % – 15 %. Es konkurrieren für formanisometrische Partikel zwei gegenläufige Mechanismen. Zum einen wird die Reibung durch Dilatanz und zum anderen durch Ausrichtung der Teilchen und eine damit verbundenen möglichen Packungsdichteerhöhung verringert. Es resultieren daher mittlere Packungsdichten, da sich die Effekte teils gegenseitig kompensieren. Zum besseren Vergleich der Materialien werden die mittleren Packungsdichten in einer 1 cm breiten Schicht, 1 cm unter der Oberfläche, angegeben, vergleiche Abbildung 3.22. Alle Materialien, bis auf die Kugeln, zeigen eine Dichteverringerng in der Scherzone. Der größte Abfall ist für die gezeigten Dübel zu erkennen. Die anderen anisometrischen Teilchen, Bohnen und Linsen, kompensieren den Dichteabfall mit größerer Ordnung. Kugeln und Erbsen zeigen, wie im nächsten Abschnitt vorgestellt, eine ausgeprägte und geringe Kristallstruktur und damit Ordnung, so dass Dilatationseffekte vollständig oder teils aufgehoben werden können. Für Kugeln ist sogar eine Packungsdichteerhöhung innerhalb des gescherten Bereichs zu erkennen. Für die anisometrischen Partikel würden sich in einer zufälligen Packung [28, 33, 34] leicht höhere Packungsdichten als hier ergeben. Die Dilatationseffekte werden also nicht vollständig durch die Packungsdichteerhöhung durch Ordnung kompensiert. Für Linsen ist die Abweichung am geringsten. Für diese Partikel wird eine Dichte von ca. 0,67 für das Aspektverhältnis 0,44 erwartet. Aus Abbildung 3.22 ist abzulesen, dass dies nur in den äußersten Randbereichen erreicht wird. Hier könnte auf Grund der Größe der Teilchen diese Dichte, auch durch Ordnungstendenzen durch die naheliegende Containerwand, hervorgerufen werden.

Für Bohnen mit den beiden Aspektverhältnissen 2,03 und 2,75 wäre eine Dichte von etwa 0,7 zu erwarten. Die experimentellen Daten zeigen eine Dichte von 0,64. Hier können für sehr weit innenliegende Bereiche der Scherzelle keine Packungsdichten bestimmt werden, da diese nicht auf den Tomogrammen zu sehen sind. Wie bei Linsen zeigt sich ein geringer Abfall der Packungsdichte zur Scherzone hin.

Für die Q2-Dübel würde die größte Packungsdichte, ca. 0,71, der drei anisometrischen Materialien erwartet werden. Diese zeigen jedoch auf Grund ihrer Zylinderform eine deutlich geringere Dichte als die Ellipsoide. Für diese Partikel ist auch der stärkste Abfall der Dichte zu erkennen.

Für die annähernd runden Partikel, Erbsen, sind ähnliche Ergebnisse in der Literatur [43] zu finden. Dort wurden Mohnsamen untersucht. Die genutzte Füllhöhe der Erbsen liegt mittig zwischen zwei der von Sakaie et al. [43] studierten Höhen. Für die Samen wurden maximale Dichteänderungen von 10 % bzw. 20 % gemessen. Für die Erbsen ergibt sich eine Dichteverringerng von ca. 7 %. Dies ist etwas kleiner als der erwartete Mittelwert, da die Erbsen eine Nahordnung, dies wird im nächsten Abschnitt beschrieben, aufweisen.

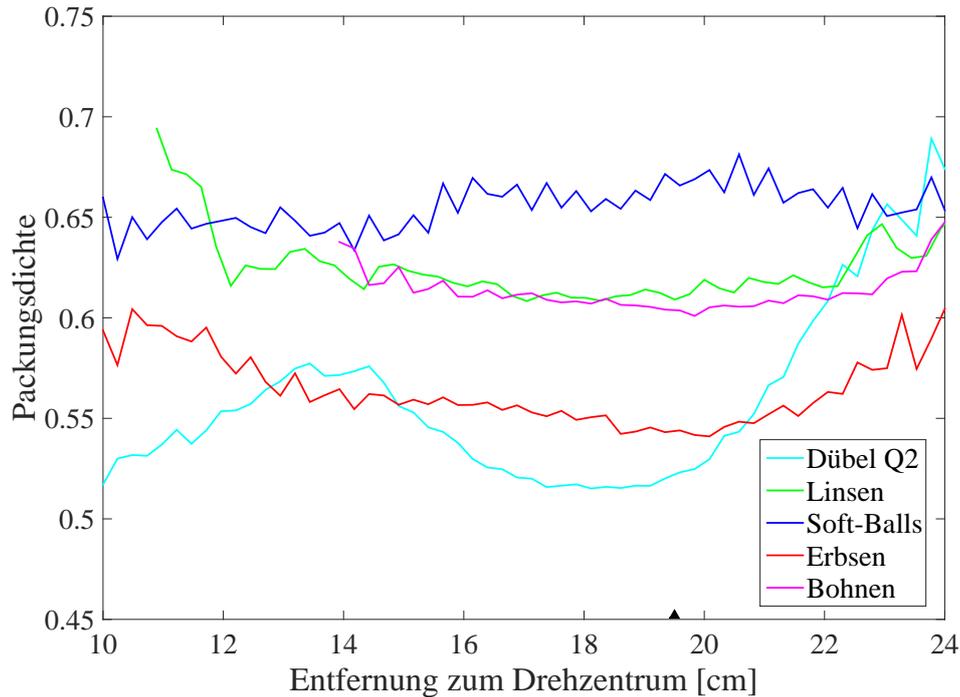


Abbildung 3.22: Mittlere Packungsdichte für verschiedene Materialien. Die Dichten wurden in der Höhe 10 - 20 mm unter der Oberfläche gemittelt. Das schwarze Dreieck markiert den Rand der rotierenden Platte.

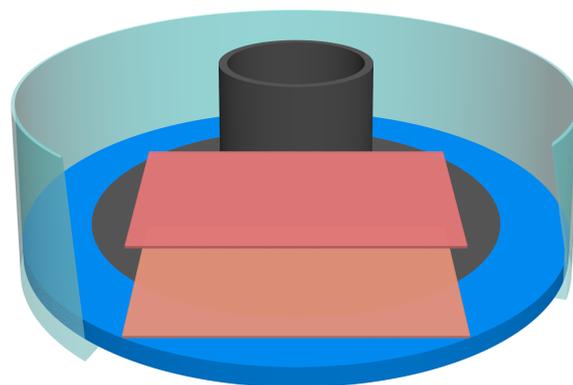
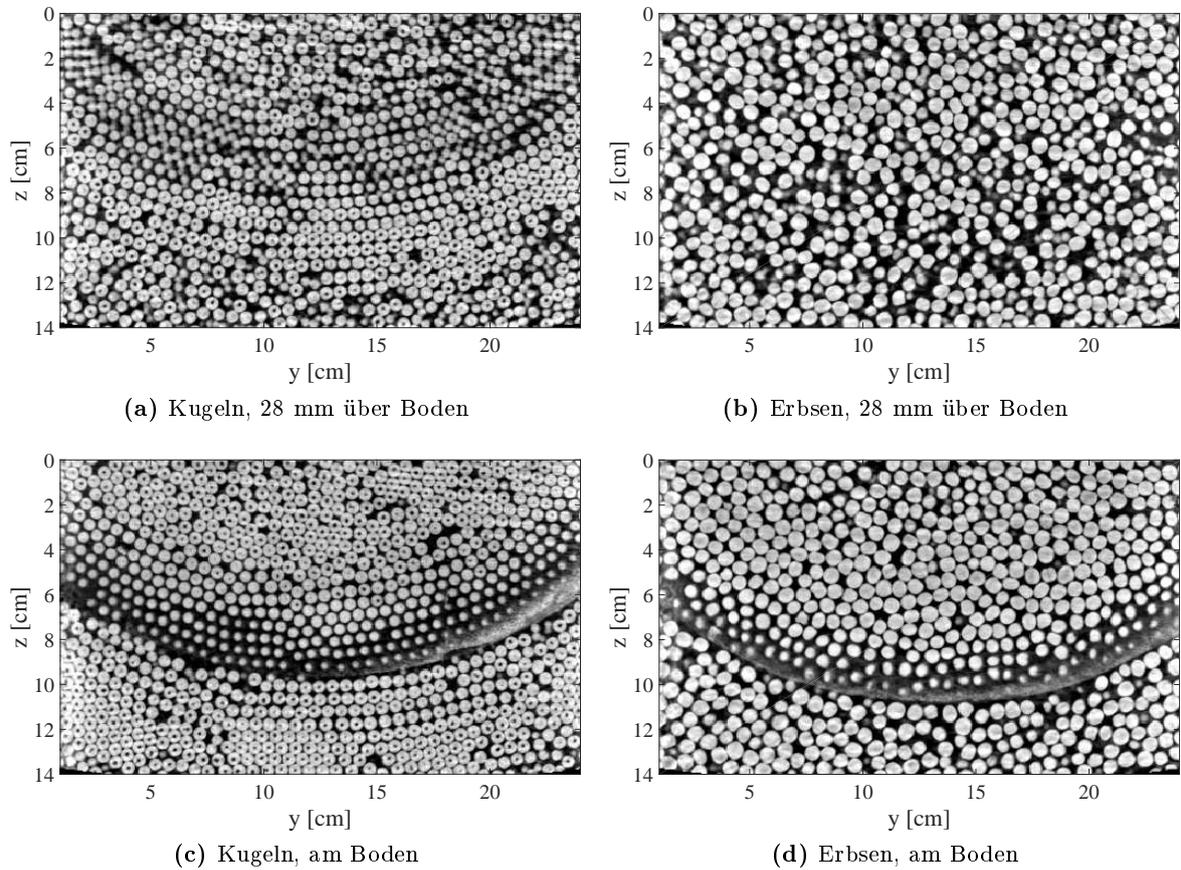
Lagenbildung und Kristallstruktur

Für alle Dichteabbildungen tritt, ausgehend vom Boden, eine Lagenstruktur auf. Es bilden sich eine bis mehrere horizontale Lagen von Teilchen, die durch den Randeinfluss des Bodens entstehen. Hierbei sind, außer bei den Soft-Ball-Kugeln, durchgehende Streifen zu erkennen, da die Teilchen mit unterschiedlichen Ausrichtungen meist flach auf dem Boden liegen. Die Schichten haben die folgenden Abstände: $D_{\text{Dübel Q2}} \approx 0.47$ mm, $D_{\text{Bohnen}} \approx 0.67$ mm, $D_{\text{Erbsen}} \approx 0.61$ mm und $D_{\text{Soft-Ball}} \approx 0.47$ mm. Die Lagenabstände liegen unter dem Durchmesser der Teilchen. Für Bohnen, die zwei ähnlich kurze Achsen besitzen, liegt der Abstand zwischen den kleinsten Teilchenabmessungen. Der Abstand ist etwas kleiner als ein Teilchendurchmesser, da sich die Schichten teils durchdringen. Die Teilchen können sich in Freiräume der oberen Grenze einer unteren Lage legen.

Für Linsen ist der Abstand, auf Grund dessen, dass sie vergleichsweise groß sind und daher nur wenige, undeutliche Lagen ausbilden, nicht eindeutig bestimmbar. Hier agieren zwei Mechanismen gegeneinander. Zum einen wollen sich die Linsen einfüllbedingt flach auf dem Boden anordnen. Zum anderen stellen sich die Teilchen in der Scherzone auf, um parallel zum Scherfluss zu stehen.

Dieser Effekt der Lagenbildung wurde auch in [10, 116] für längliche Partikel in einem Rohr beschrieben. In beiden Publikationen treten, im vergleichsweise kleinen Container, an den Rändern von diesen induzierte Teilchenlagen und damit eine gewisse Ordnung, auf.

Für perfekte Kugeln tritt eine starke Ordnung in Form einer kristallinen Struktur auf. Dass diese Ordnung noch nach der Mittelung erkennbar ist, zeigt, dass für verschiedene Tomo-



(e) Lage der abgebildeten Schichten in der Scherzelle

Abbildung 3.23: Tomogrammschnitte für (a,c) Kugeln und (b,d) Erbsen in 2 verschiedenen Höhen. Die Schichten sind in (e) gekennzeichnet. Die dunklere, obere Schicht liegt bei einer Höhe von 28 mm über dem Boden, die hellere, untere Schicht genau auf Höhe des Bodens der Zelle. Der Ausschnitt ist jeweils für ein Material der gleiche, nur die Höhe ändert sich.

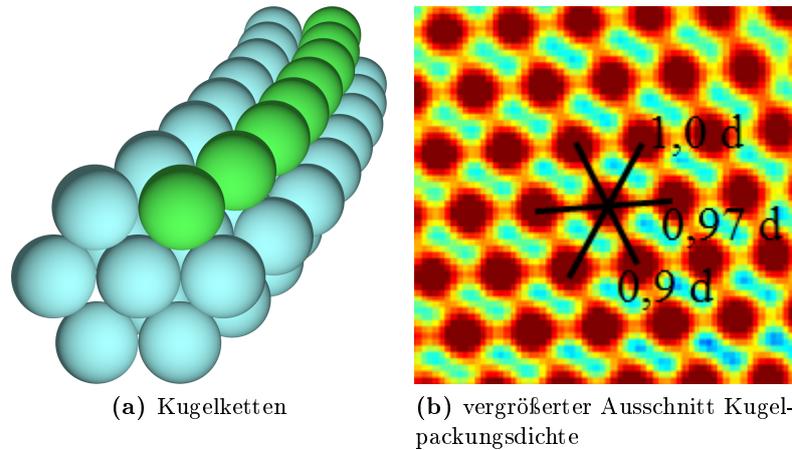


Abbildung 3.24: (a) Verdeutlichung der Lage der Soft-Ball-Kugeln. Teilchen liegen in gebogenen Ketten um das Zellinnere. (b) Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 3.21 (e) zeigt Lagenabstände der Kugeln. Schicht 1 - 4 cm unter der Oberfläche, 17 - 20 cm von Drehzentrum der Zelle entfernt.

gramme Teilchen gleicher Höhe den gleichen Abstand zum Drehzentrum der Zelle haben. Die Kugeln liegen in fast perfekten Ringen um die Mitte. Dies ist auch in Abbildung 3.23, die einzelne Schnitte eines Tomogramms zeigt, erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich ausgehend von der Kante zwischen mitbewegtem und still stehendem Teil der Zelle, die Ordnung ausbildet. Hier gibt es eine klar definierte Stelle, an die sich die Partikel anlagern können. Am Boden orientieren sich je einige Lagen der Teilchen zur Mitte und zum Zelläußeren entlang der Kante zwischen gedrehtem und unbewegtem Teil des Materials. Weiter oben im Granulat ist die kristalline Struktur weiter verbreitet. Über die Scherzone hinaus werden die Teilchen mit langer Reichweite geordnet.

Die Kugeln bilden ein hexagonales Gitter, wie in Abbildung 3.21 (e) und vergrößert in Abbildung 3.24 (b) zu erkennen ist. Eine Richtung des Gitters ist durch den Boden vorgegeben. Die Schichten liegen parallel zu ihm. Eine weitere Richtung wird durch die Scherrichtung vorgegeben. Das Gitter verläuft mit leichter Neigung zum Zellinneren.

Durch die Krümmung der Zelle ergeben sich insgesamt hexagonal gepackte Kugel-Ketten, wie in Abbildung 3.24 (a) dargestellt. Es wird schematisch eine Kugelkette eines hexagonalen Musters gezeigt. Diese Ketten können unter Scherung gut aneinander vorbeigleiten und weisen daher eine geringe Reibung auf. In den Schichten des Tomogramms sind auch Versetzungen dieser regelmäßigen Struktur zu erkennen.

Die Periodizität der Struktur liegt je nach Richtung genau bei oder knapp unter dem Partikel-durchmesser. Einige Teilchenkettens überlappen also in bestimmten Richtungen. Zwei Richtungen zeigen keinen oder sehr geringen Überlapp, so dass die Reibung unter Scherung reduziert wird. Die Richtung mit dem größten Überlapp, also die des kürzesten Abstands, liegt etwa senkrecht zum Schergradienten. In diese Richtung werden die Kugeln höchstens gering aneinander vorbei geschoben.

Ähnliche Kristallisationseffekte wurden auch in [52, 54] beschrieben. Hier ergeben sich ebenfalls aufgereichte Kugelketten, um die Reibung und damit die Scherkräfte zu minimieren.

Eine geringe Abweichung von der perfekten Kugelform und von der Monodispersität verhindert langreichweitige Ordnungsphänomene. Dies kann an den leicht unregelmäßigen Partikeln,

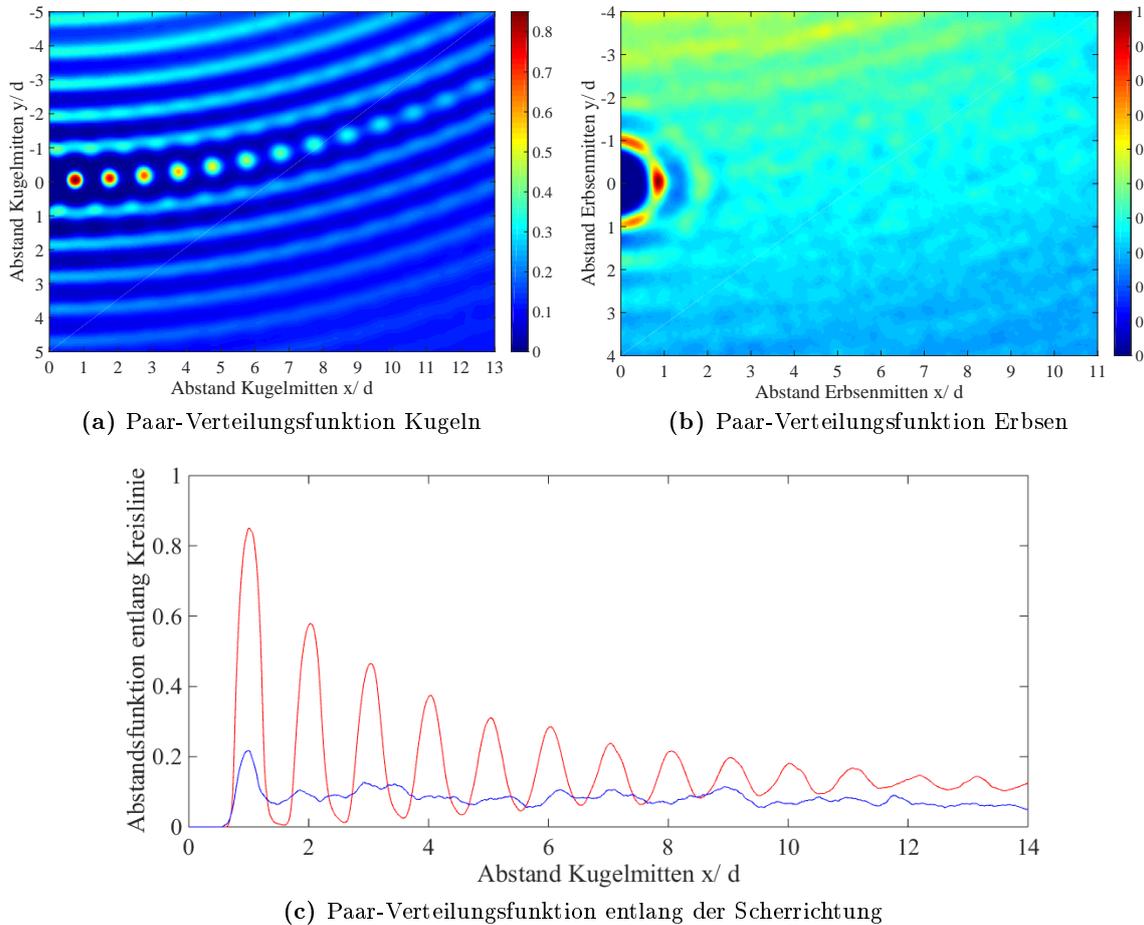


Abbildung 3.25: Paar-Verteilungsfunktion für (a) Soft-Ball-Kugeln und (b) Erbsen im stationären Zustand. Untersucht wurden Partikel der Höhe 3 - 4 cm unter der Granulatoberfläche in einem Abstand von 18 - 19 cm vom Drehzentrum. Die Funktion zeigt die Wahrscheinlichkeit zwei Partikelzentren im Abstand Δx , Δy und Δz zu finden. In einer horizontalen Ebene ist Δy ist der Abstand in radialer Richtung, Δx der in senkrechter Richtung und Δz in vertikaler Richtung. $|\Delta z|$ ist auf einen Partikelradius beschränkt. (c) Paar-Verteilungsfunktion entlang der Scherrichtung.

Erbsen, erkannt werden. Schon beim Betrachten einzelner Tomogrammschichten, wie in Abbildung 3.23 (b,d), gezeigt, ist zu sehen, dass sich Erbsen nicht mehr in Kugelketten aufreihen. Am Boden, nah der Kante zwischen bewegtem und unbewegtem Bereich kann noch eine geringe Ordnung erahnt werden. Mit steigender Höhe verliert diese sich vollständig.

Um die Unterschiede in der Anordnung zwischen monodispersen Kugeln und dispersen, leicht von der Kugelform abweichenden Partikeln genauer betrachten zu können, werden in Abbildung 3.25 Paar-Korrelationsfunktionen für die Materialien im stationären Zustand betrachtet. Für Kugeln ist zu erkennen, dass in Scherrichtung noch über einen weiten Bereich Kugeln aufgereiht liegen. Auch noch 13 Partikeldurchmesser vom Mittelpunkt des angenommenen Teilchens entfernt, gibt es eine signifikant erhöhte Wahrscheinlichkeit für das Antreffen eines Teilchens, genau in dieser Richtung. Die Flussrichtung ist auf Grund der Kreisgeometrie gekrümmt. Im Abstand von einem Partikeldurchmesser ist fast immer ein Teilchen vorhanden.

Außerdem ist zu erkennen, dass parallel zur Hauptlinie weitere Kugelketten verlaufen. Bei Erbsen ist zu sehen, dass im Abstand von einem Durchmesser noch sehr wahrscheinlich Teilchen anzutreffen sind. Die Partikel liegen am wahrscheinlichsten genau in Scherrichtung, bzw. genau senkrecht dazu. Im Abstand von zwei Durchmessern deutet sich dies schon nur noch sehr schwach an. Partikelketten sind sehr geringfügig zu erkennen.

Diese Trends sind auch in Abbildung 3.25 (c) deutlich zu sehen. Für den Abstand von einem Teilchendurchmesser werden sowohl Soft-Ball-Kugeln, als auch Erbsen angetroffen. Für Erbsen gibt es dann bei einer Entfernung von zwei Durchmessern nur noch ein kleines Maximum. Danach ist keine Ordnung mehr erkennbar. Für die Kugeln weisen mindestens 13 Nachbarkugeln eine erhöhte Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Durchmesservielfachen in Flussrichtung auf.

Zeitliche Entwicklung

Die zeitliche Entwicklung der Packungsdichten wird für ähnliche Drehwinkel des Inneren der Scherzelle im Folgenden für verschiedene Materialien vorgestellt. Hierbei werden Kugeln, zur Visualisierung der Ausbildung der Kristallisation, siehe Abbildung 3.26, und Erbsen, als polydisperse, nicht perfekt runde Partikel, zum Vergleich in Abbildung 3.27, gezeigt. Außerdem werden Dübel mit Aspektverhältnis 2 in Abbildung 3.28 betrachtet, da sie die größte Packungsdichtedifferenz zwischen Scherzone und ungeschertem Teil, aufweisen.

Für alle drei Materialien ergibt sich, abgesehen von z.B. Kristallisationseffekten, mehr oder weniger stark ausgeprägt, der folgende Verlauf.

Der Bereich der Scherzone unterliegt einer Anfangsdilatation, die einen Hügel über dieser Zone wachsen lässt. Der Hügel entsteht, da die Partikel darunter weniger dicht packen und daher ein größeres Volumen einnehmen. Hier wird ebenfalls Material zu den Seiten der Scherzone gedrückt und somit wird ein breiterer Bereich als die Scherzone aufgelockert. Dies ist je in den ersten drei Bildern zu erkennen. Hier liegt eine Rotation des inneren Teils der Scherzelle um ca. 20° vor.

Im zweiten Schritt fällt der Hügel direkt über der Scherzone zusammen und bildet teils eine Senke über der Zone, da sich die Partikel dort umordnen bzw. neu ausrichten. An den Rändern der Scherzone bleiben kleine Hügel zurück. Auf die Oberflächenmodulationen wird im nächsten Kapitel 3.1.4 eingegangen.

Die unterschiedlichen Endwinkel der einzelnen Experimente ergeben sich aus unterschiedlich lang durchgeführten Experimentserien. Für Kugeln wurden 115, für Erbsen 220 und für die Dübel 354 Tomogramme aufgenommen.

Für Kugeln ist nur anfänglich ein geringer Dichteabfall erkennbar. Durch diese leichte Auflockerung können sich die Teilchen neu positionieren und durch Kristallisationseffekte die Reibung minimieren. Für die ersten fünf Bilder zeigt sich nur eine Ordnung von Teilchenschichten parallel zum Boden. Ab einer Rotation um ca. 70° zeigt sich eine erste Kristallstruktur am Boden der Scherzelle. Diese wächst von unten nach oben und seitlich. Eine leichte Einbuchtung der Oberfläche ist auf Grund dessen am Ende des Experiments zu erkennen.

Für Erbsen ist eine leichte Packungsdichteverringerung am Anfang zu sehen. Diese beträgt ca. 7% und kann damit begründet werden, dass sich die Teilchen neu anordnen und eine geringe Nahordnung ausbilden. Es entsteht ein kleiner Hügel über der Zone, der gegen Ende eine leichte Mulde aufweist.

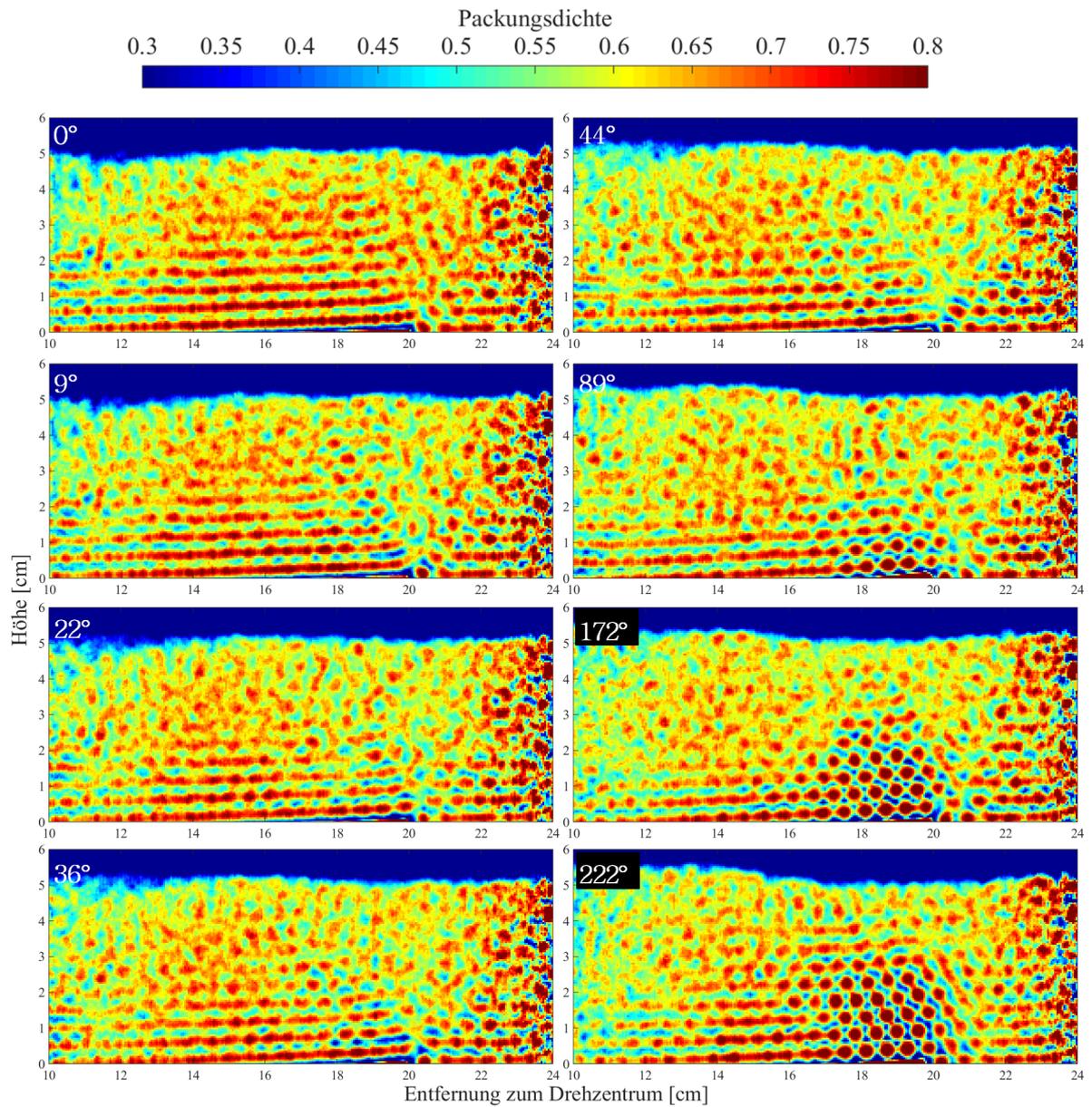


Abbildung 3.26: Entwicklung der Packungsdichte von perfekten Kugeln, Soft-Balls. Für jedes Bild wurde ein Tomogramm gemittelt. Die Winkel in jedem einzelnen Bild geben an, wie weit der innere Teil der Scherzelle gedreht wurde. Die drehbare Scheibe endet bei einer Entfernung von ca. 19 cm.

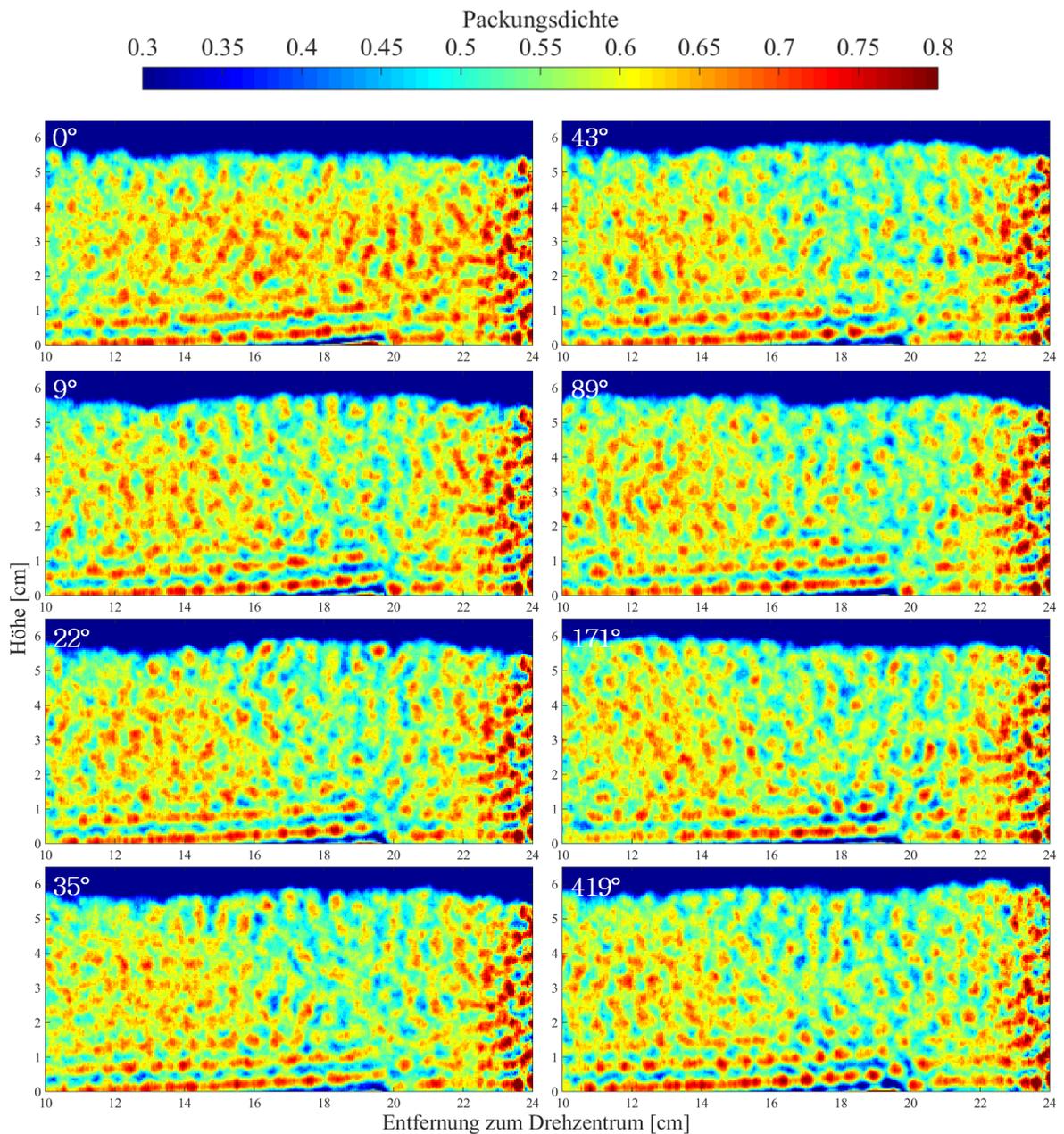


Abbildung 3.27: Entwicklung der Packungsdichte von Erbsen. Für jedes Bild wurde ein Tomogramm gemittelt. Die Winkel in jedem einzelnen Bild geben an, wie weit der innere Teil der Scherzelle gedreht wurde. Die drehbare Scheibe endet bei einer Entfernung von ca. 19 cm.

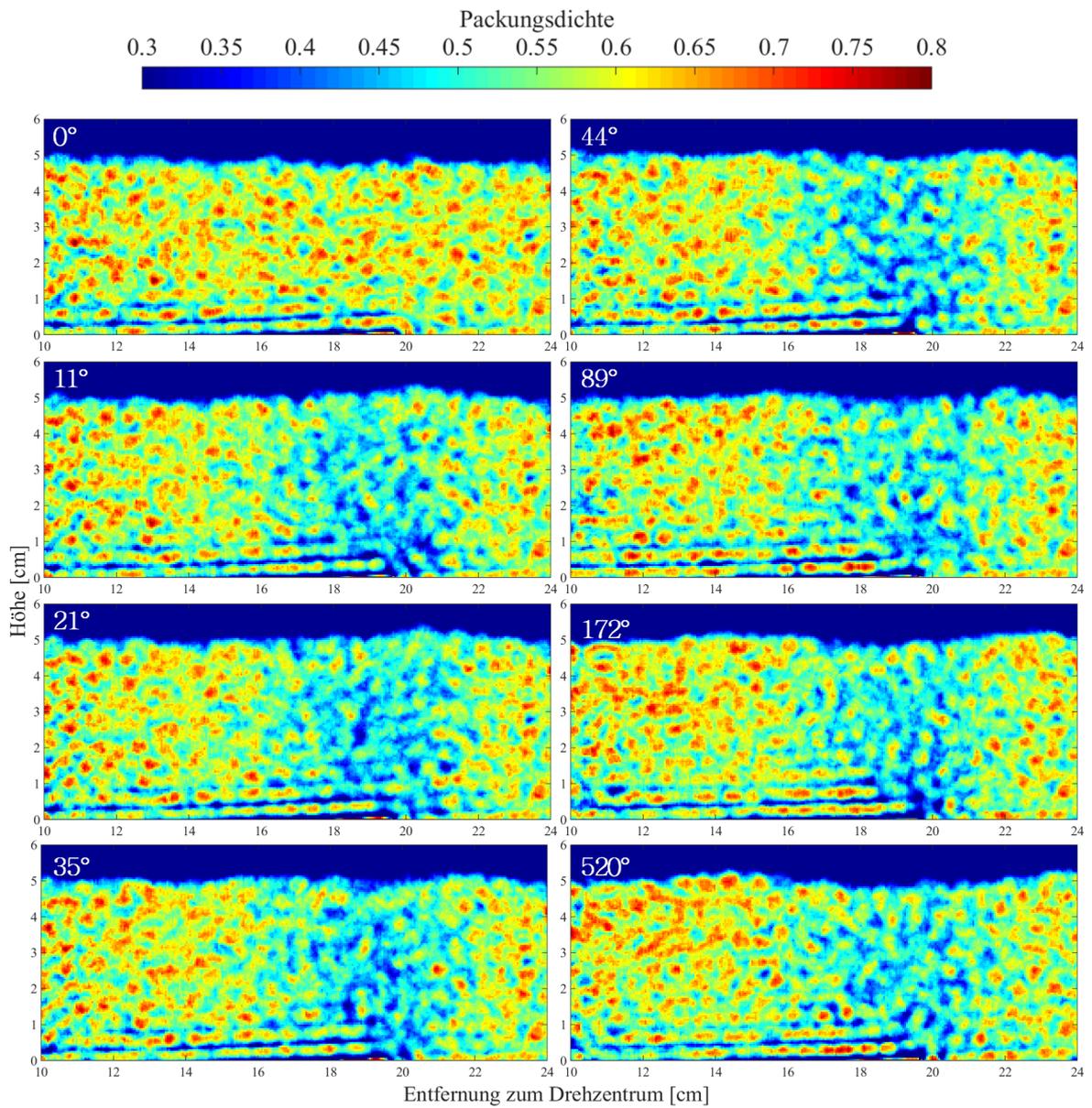


Abbildung 3.28: Entwicklung der Packungsdichte von Dübeln Q2. Für jedes Bild wurde ein Tomogramm gemittelt. Die Winkel in jedem einzelnen Bild geben an, wie weit der innere Teil der Scherzelle gedreht wurde. Die drehbare Scheibe endet bei einer Entfernung von ca. 19 cm.

Für die betrachteten Dübel mit Aspektverhältnis 2 ist der oben beschriebene Trend am besten zu erkennen. Die Packungsdichte fällt anfänglich um ca. 15%. Nach Neuausrichtung im Scherfluss ist eine Verringerung, verglichen mit dem Anfangswert, von ca. 10% verbleibend. Für Dübel mit größerem Aspektverhältnis verstärkt sich der anfängliche Packungsdichteabfall und damit die Hügel- und Senkenbildung. Die Packungsdichte steigt nach der anfänglichen Verringerung merklich. Sie nimmt dann einen stationären Wert an.

3.1.4 Oberflächenmodulationen

Nach dem Einfüllen des Granulats in die Scherzelle liegt eine glatte Oberfläche vor. Dies kann an den jeweils ersten Bildern der Abbildungen zur Entwicklung der Packungsdichte im vorherigen Kapitel gesehen werden. Je nach Material bildet sich unter Scherung eine unebene Oberfläche. Gemittelte Oberflächenprofile sind in Abbildung 3.29 für den stationären Zustand für Dübel verschiedener Größen, Bohnen, Linsen, Erbsen und Soft-Ball-Kugeln, dargestellt.

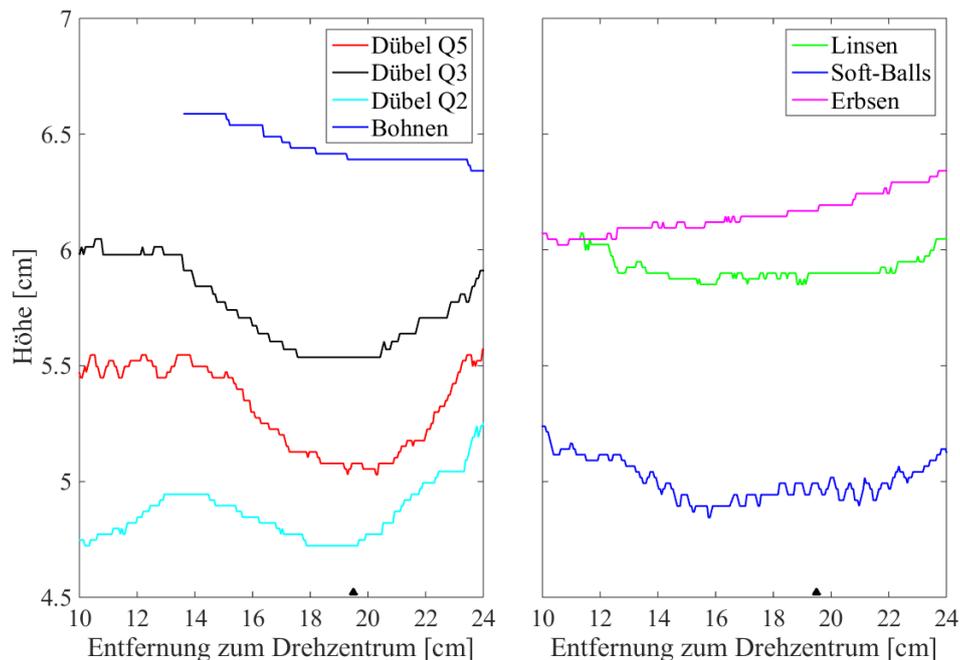


Abbildung 3.29: Höhe des Granulats über dem Abstand zum Drehzentrum der Scherzelle für verschiedene Materialien. Das schwarze Dreieck markiert den Rand der rotierenden Platte.

Zuerst kann festgestellt werden, dass nicht für alle Materialien die gleiche Füllhöhe verwendet wurde. Die geringen Füllhöhen stellen jedoch kein Problem dar, da sie bei Materialien mit vergleichsweise kleinen Partikelgrößen eingesetzt wurden.

Die stärkste Änderung des Höhenprofils, verglichen mit einer glatten Oberfläche, weisen Dübel auf. Es bildet sich eine Mulde oberhalb der Scherzone. In der Mitte der Scherzone wird zuerst das Material aufgelockert, um aneinander vorbei bewegt werden zu können. Dadurch kommt es, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, zu einem Hügel. Bei der Dilatation wird auch Material der Scherzone in seitlich anliegende Bereiche gedrückt. Unter Scherung richten sich dann die Partikel aus, so dass sie weniger Platz benötigen und die Oberfläche sinkt ein. In den benachbarten Bereichen bleiben die durch die Dilatation verschobenen Teilchen vorhanden, so dass hier eine leichte Erhöhung der Oberfläche zu sehen ist.

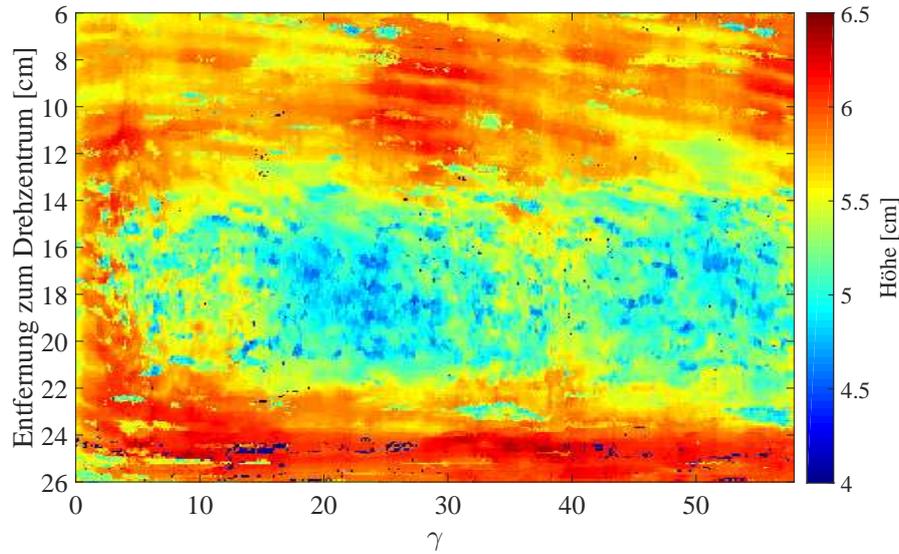


Abbildung 3.30: Entwicklung der Höhe des Granulats über dem Abstand zum Drehzentrum der Scherzelle für Dübel Q5. $\gamma = 0$ entspricht dem Zustand nach dem Einfüllen, idealerweise einem völlig ungeordneten. Direkt nach dem Einfüllen ist die Oberfläche flach.

Trotz ähnlicher Form zeigen Bohnen nur einen Abfall der Oberfläche zum Zelläusseren. Runde und oblate - oder große - Partikel zeigen nur eine geringere Änderung der Oberfläche. Der stärkste Effekt tritt hier bei Kugeln auf. Die Oberfläche sinkt auf Grund der Ordnung ebenfalls leicht ein. Für Linsen könnte der Effekt, trotz Ordnungsphänomenen, so gering auf Grund ihrer Größe sein. Stellen sich die Partikel auf, entspricht die benutzte Füllhöhe nur etwa 3,2 Partikeldurchmessern. Der Versuch könnte zur Überprüfung mit Linsen, statt den verwendeten Schokoladenlinsen, durchgeführt werden. Die Auflösung des zur Verfügung stehenden Computertomografen würde aber nicht für das Darstellen einzelner Partikel reichen. Die Oberflächenerfassung wäre jedoch möglich.

Ein kurzer Test mit anderen Linsen des Durchmessers $d = 7$ mm und der Dicke $l = 2$ mm wurden in einem ähnlichen Aufbau für verschiedene Füllhöhen durchgeführt. In diesem Schercontainer gibt es keinen Mittelzylinder. Für verschiedene Verhältnisse von Containerdurchmesser D_C zu Füllhöhe H ($H/D_C = 7,1; 5,7$ und $4,3$) ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Höhenänderungen. Als einen Grund hierfür wird das Aufstellen der Linsen in der Scherzone angesehen.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Oberfläche in Abhängigkeit der Scherung für eins der Materialien mit großer Oberflächenmodulation untersucht. Für Dübel Q5 ist der Verlauf in Abbildung 3.30 dargestellt. Die Höhe der Oberfläche ist farbcodiert aufgetragen. Anfangs, direkt nach dem Einfüllen, ist die Oberfläche eben, was an der gleichmäßigen Farbgebung zu sehen ist. Danach ist ein leichtes Ansteigen der Oberfläche erkennbar und letztendlich wird über der Scherzone eine Senke ausgebildet. Bei $\gamma \approx 11$ und $\gamma \approx 40$ treten Erhöhungen der Oberfläche auf. Zwischen diesen beiden Punkten liegt eine volle Umdrehung. Die Erhebung ist vermutlich bedingt durch das Einfüllen. Lag hier anfangs eine höhere Oberfläche im Aufnahmebereich der Scherzelle im Tomogramm vor, kann die Oberfläche nicht so weit wie im Rest der Zelle absinken. Diese erhöhte Fläche wird dann weiter gedreht und wäre in diesem Diagramm immer nach einer weiteren Umdrehung zu sehen.

3.2 Siloexperimente

In diesem zweiten Ergebnisteil werden Experimente, in denen der Scherfluss durch das Verstopfen eines Silos abreißt, vorgestellt und diskutiert. Es wird auf die Ausrichtung und die Packungsdichte innerhalb des Versuchscontainers eingegangen. Anschließend wird die erste Lage von Partikeln am verstopften Ausfluss näher untersucht.

3.2.1 Ausrichtung anisometrischer Granulate

Zur Untersuchung des Verhaltens von Granulaten in einem Silo werden jeweils nach dem spontanen Verstopfen der Öffnung durch die Partikel Computertomografie-Aufnahmen angefertigt. Zwei Schnitte durch diese Tomogramme sind in Abbildung 3.31 gezeigt. Unten in der Mitte der beiden Schnitte ist jeweils die Siloöffnung zu erkennen. Darüber befindet sich im oberen Bild ein kuppelförmiger Freiraum, in dem sich keine Teilchen befinden. Die erste Lage von Partikeln darüber wird im Folgenden Dom genannt. Des Weiteren ist im oberen Bild ein größerer Freiraum in der Höhe 6 cm bis 8 cm bei $r = -4$ cm bis $r = 0$ cm erkennbar. In der Mitte des Silos bewegen sich die Dübel damit können sich Kraftketten bilden und auflösen. Bei diesen langen Stäbchen verkanten sich die Teilchen so, dass auch gut sichtbare Freiräume darunter entstehen können. Fließt das Granulat weiter aus, wird der Hohlraum aufgelöst oder die Teilchen darüber noch ein kleines Stück in gleicher Konfiguration weiterbewegt, so dass er noch kurzzeitig bestehen bleibt.

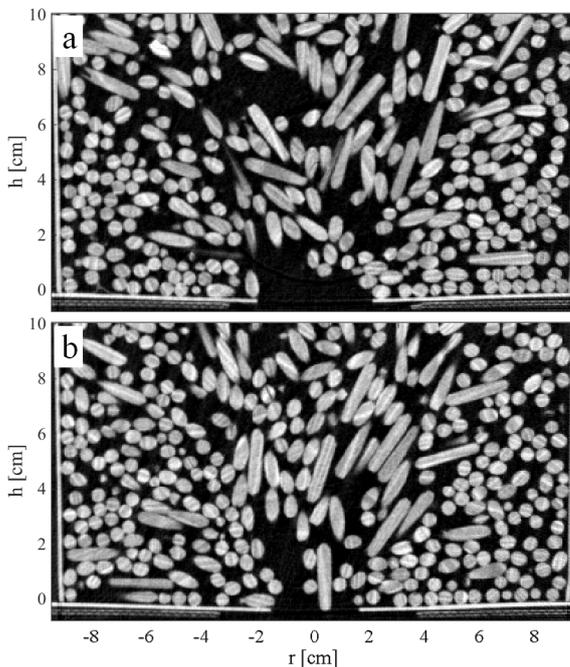


Abbildung 3.31: Querschnitte durch Tomogramme von Dübeln Q5 beim Verstopfen, (a) Verstopfung oberhalb des Auslasses, so dass sich ein kuppelförmiges Loch bildet. Die erste Lage von Teilchen darüber wird als Dom bezeichnet. (b) Partikel ragen weit in den Hohlraum hinein.

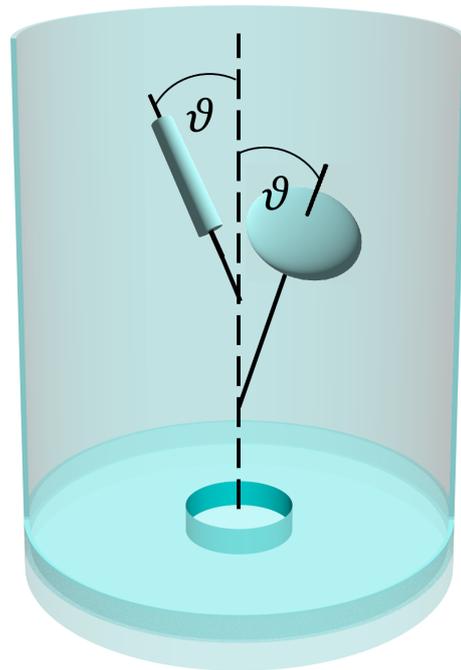


Abbildung 3.32: Winkelbezeichnung im Silo für verschiedene Granulattypen: links: Zylinder/ Dübel, rechts: Linse. ϑ beschreibt je den Winkel der Achse des Teilchens zur Vertikalen.

Im unteren Bild ragen Stäbchen bis in die Öffnung des Silos hinein. Durch andere Dübel gehalten, stehen einige Teilchen teils aus der Öffnung heraus. Im Bereich über der Öffnung ist zu erkennen, dass sich viele Teilchen am Fluss ausgerichtet haben. Sie zeigen in Richtung des Auslasses.

Fließende Bereiche

Nach dem ein Silo verstopft, wird ein Tomogramm von der Granulatkonfiguration erstellt. Um eine neue Teilchenanordnung nach erneutem Verstopfen aufzunehmen, wird das Silo aus dem Aufnahmebereich entfernt und die Verstopfung gelöst. Granulat fließt aus bis das Silo erneut verstopft. Danach wird es wieder im Aufnahmebereich positioniert. Aus unterschiedlichen Verstopfungszuständen kann ermittelt werden welche Bereiche fließen. Zuerst wird durch Drehung der Tomogramme eines Materials die gleiche Ausgangsposition zwischen ihnen hergestellt. Dabei wird das zweite Tomogramm so gedreht, dass das unbewegte Material nahe der Silowand in einer Höhe von 0 - 5 cm zur Deckung mit dem Granulat dieses Bereichs des ersten gebracht wird. Die Drehung der Tomogramme wird nötig, wenn das Silo nicht genau gleich wie vor dem Bewegen positioniert wurde. Nach der Drehung der Tomogramme wird durch Differenzbildung verschiedener Tomogramme betrachtet, welche Granulatgebiete im Silo fließen. Die fließenden und unbewegten Gebiete sind in Abbildung 3.33 für verschiedene Materialien je für einen Siloöffnungsdurchmesser dargestellt. Sich verändernde Gebiete werden rötlich, stehende Bereiche bläulich dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Methode und der resultierenden Werte ist Anhang A.4 zu entnehmen.

Fehler können in der Farbgebung entstehen, wenn es nicht möglich ist aufeinanderfolgende Tomogramme, anhand der äußeren Partikel, auf die exakt gleiche Position zu drehen. Wird das Silo nach einer Lawine in die Aufnahmeposition gestellt, wird eventuell nicht genau die gleiche Lage wie beim vorherigen Tomogramm getroffen. Ergeben mehrere Drehwinkel eine gute Übereinstimmung mit dem vorherigen Tomogramm, wird die mittlere Position gewählt. Es bleibt jedoch ein Restfehler vorhanden. Dies wird besonders deutlich in den Bildern c und e. Hier ist es nicht möglich die äußeren Partikel für jedes Tomogrammpaar zum Decken zu bringen. Für die restlichen Materialien ist es gut möglich.

In der Abbildung 3.33 ist zu erkennen, dass sich alle Materialien in der Mitte des Silos bewegen. Am unteren Ende hat die ausfließende Schicht einen Radius von ca. 2 - 3 cm. Bei einer Höhe von 10 cm bewegt sich fast das gesamte Material einer Höhe. Nur Schichten an der Silowand werden auf Grund von Reibung wenig bewegt. Dies wurde auch in verschiedenen Publikationen [83–86] bei unterschiedlichen Granulatformen festgestellt. Nahe der Öffnung scheint das Granulat für viele Materialien nicht bzw. wenig zu fließen, da hier in vielen Tomogrammen kein Granulat vorhanden ist. Beim Verstopfen des Silos bildet sich eine Teilchenkuppel, die das weitere Granulat am Ausfließen verhindert. Diese Kuppel kann vorerst als Halbkugel angesehen werden. Für die Schokoladenlinsen ist diese Kuppel sehr flach, wie in folgenden Kapiteln gezeigt werden wird. Daher erstreckt sich der fließende Bereich bis fast zur Siloöffnung.

Der untere äußere Bereich, in den Bildern dunkelblau dargestellt, fließt nicht aus dem Silo aus. Zwischen fließendem und stehendem Teil ist eine Schicht, die teils geschert wird bzw. welche langsamer ausfließt. Insgesamt liegt für diesen letzten Grenzteil und das vollständig bewegte Gebiet ein Scherfluss vor. Hier kann die Ausrichtung von Teilchen untersucht werden, da sie nicht durch das Einfüllen, sondern durch den Ausfluss bedingt ist.

Außerdem sind die Grenzen zwischen den stehenden und bewegten Gebieten für alle Materialien bei einem festen Grenzwert von 0,5, siehe Farbskala in Abbildung 3.33, zum Vergleich

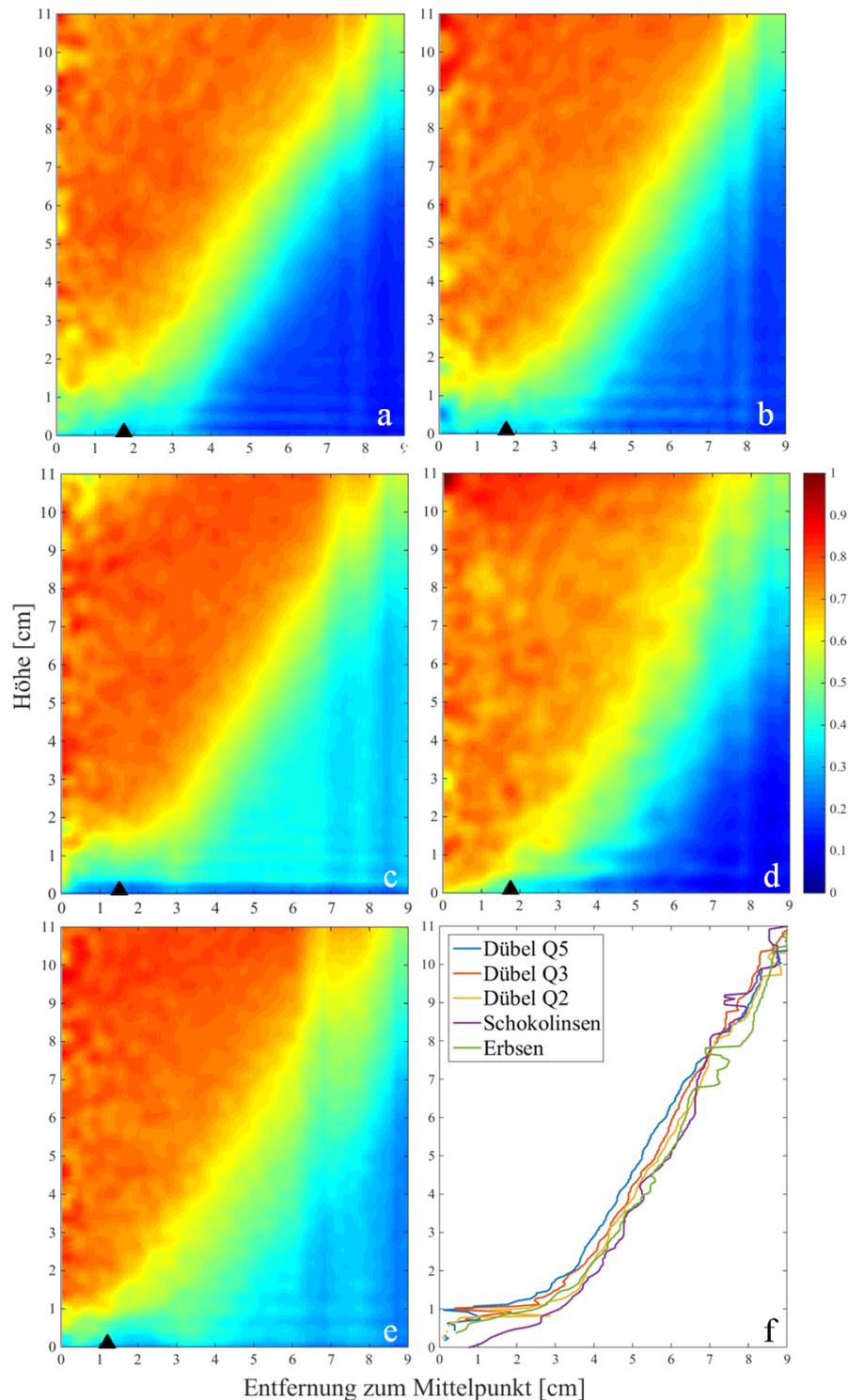


Abbildung 3.33: Fließende (rote) und unbewegte (blaue) Gebiete im Versuchssilo für verschiedene Materialien: (a) Dübel Q5, (b) Dübel Q3, (c) Dübel Q2, (d) Schokoladenslinsen und (e) Erbsen. Rötlicher Bereich in der Mitte: ausfließender Teil, blauer Bereich außen: unbewegte Gebiete. Fehler in der Farbgebung entstehen, wenn zwei aufeinanderfolgende Tomogramme nicht auf exakt den gleichen Winkel gedreht werden können. Darauf wird im Textteil näher eingegangen. Die schwarzen Dreiecke markieren jeweils den Öffnungsradius. (f) Grenze zwischen fließenden und unbewegten Gebieten. Als Grenzwert wird 0,5 gewählt.

der verschiedenen Granulate, ermittelt wurden. Dies entspricht dem grünlichen Bereich in den einzelnen Bildern. Dies ist in Abbildung 3.33 f zu sehen. Hier sind keine Unterschiede zwischen den Materialien erkennbar. Es gibt für eine Veränderung des Aspektverhältnisses der Teilchen keinen systematischen Trend des fließenden Teils im Silo.

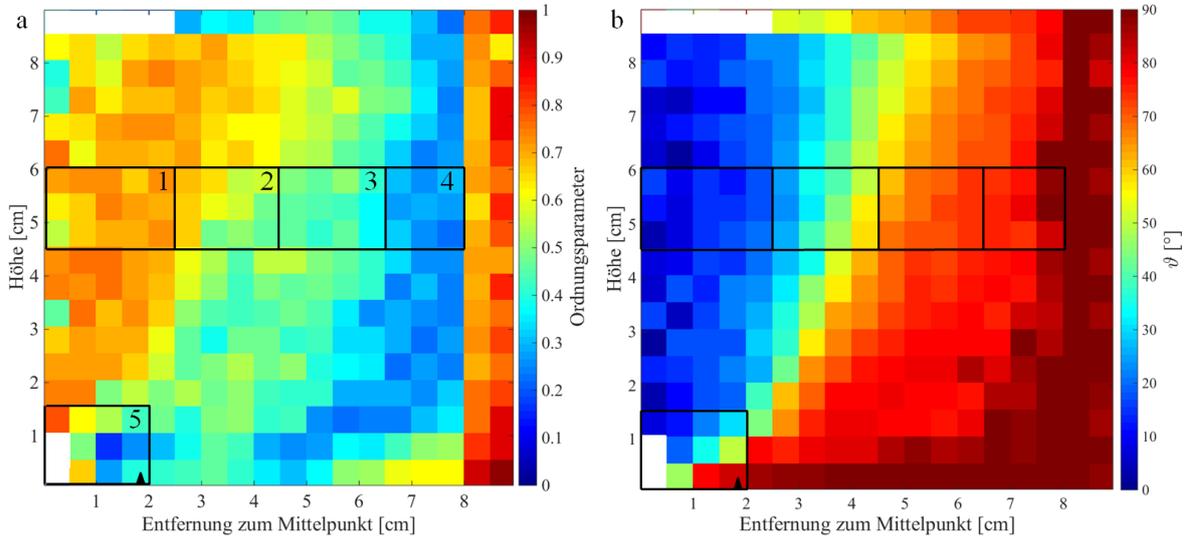


Abbildung 3.34: Ordnungspareter S und mittlerer Winkel der langen Teilchenachse zur vertikalen Achse ϑ für Dübel Q5 im nahezu zylinderförmigen Silo. Das schwarze Dreieck markiert den Öffnungsradius. Die Nummern 1 bis 5 kennzeichnen näher untersuchte Gebiete.

Ordnung und Orientierung

Für ein Material, Dübel Q5, wird der Ordnungspareter und der mittlere Winkel der langen Teilchenachse zur vertikalen Achse für verschiedene Bereiche des Silos in Abbildung 3.34 für einen Öffnungsdurchmesser von $d = 37$ mm angegeben. S und ϑ werden über den Ordnungstensor ermittelt. Eine Verdeutlichung des Winkels ist in Abbildung 3.32 für verschiedene Teilchensorten gegeben. Bei länglichen Partikeln bezeichnet der Winkel ϑ die Abweichung der langen Achse von der Vertikalen. Bei abgeplatteten Teilchen ist es der Winkel zwischen kürzester Achse und der Vertikalen. Analoge Bilder befinden sich im Anhang A.5 für die anderen Dübelsorten Q8, Q3 und Q2 und für Schokoladenlinsen.

Im inneren Teil des Silos, vor allem unterhalb von 8 cm, liegt eine erhöhte Ordnung, verglichen mit dem Rest des Granulats im Aufbau, vor. In dieser Region fließt das Material in allen Experimenten, wie im vorherigen Kapitel gezeigt. Es wird davon ausgegangen, dass der stärkste Fluss in der Mitte des Silos stattfindet und zu den Rändern hin abnimmt. Die Partikel richten sich am Schergradienten aus. Es werden Ordnungspareter um $S \approx 0,6$ und bis zu $S \approx 0,75$ erreicht. Damit liegt die Ordnung leicht unter der in der Scherzone der Split-Bottom-Zelle für das gleiche Material, vergleiche [51].

Im inneren, gescherten Teil des Granulats, liegt der mittlere Winkel zur Vertikalen ϑ um 10° bis 15° . Im Mittel zeigen die Teilchen eher unter kleinem Winkel zum Ausfluss, als dass sie flach liegen. In der Mitte des Silos kann davon ausgegangen werden, dass der Fluss direkt nach unten geht. Die Teilchen nehmen daher den angegebenen Winkel von ca. 10° zur Flussrichtung ein. Die Teilchen richten sich sehr ähnlich zum reinen Scherexperiment, vergleiche [57], am

Schergradienten aus.

Weiter oben und zu den weniger bewegten Teilen hin, nimmt die Ordnung ab. Im Bereich zwischen ausfließendem und still stehendem Material, wie Gebiet 2 oder 3, liegen geringere Ordnungsparameter vor. Hier bewegen sich die Teilchen nicht sehr weit bei der halben Leerung des Silos. Damit könnte es sein, dass die Ausrichtung noch nicht völlig abgeschlossen ist und bei größerer Scherverformung die Ordnung in diesem Gebiet weiter steigt.

In einem untersuchten Übergangsbereich zwischen bewegtem und unbewegtem Granulat, in der Höhe 6 - 7,5 cm bei einer Entfernung von 2,5 - 4,5 cm von der Symmetrieachse des Silos, liegt bei Berechnung mittels der Formel 2.3 ein verschwindender Ordnungsparameter vor. Bei $S = -0,5$ würden sich die Partikel ähnlich wie die Borsten einer Flaschenbürste anordnen. Hier geht die Struktur der Flaschenbürstenborsten in den geordneten Zustand, bei dem viele Teilchen zum Ausflussloch zeigen, über. Darauf wird näher bei der Diskussion der Verteilung des Ausrichtungswinkels ϑ eingegangen. Mit dem verschwindenden Ordnungsparameter zeigt sich, dass diese Formel im System Silo nur bedingt anwendbar ist.

Weiter nach außen steigt der Winkel auf ca. 80° an. Hier tendieren die Teilchen dazu flacher zu liegen. Sie werden fast nicht geschert. Da nach dem Ausfließen des halben Silos dieses neu befüllt wird, werden die Randschichten nicht nach längerer Zeit, wie in der Split-Bottom-Zelle, ausgerichtet.

Weiter außen fällt die Ordnung weiter ab. Wird hier der Ordnungsparameter über Formel 2.3 berechnet, ergeben sich negative Ordnungsparameter. Vor allem in den äußeren oberen Schichten liegt bereits eine Tendenz dazu vor. Diese wird durch die Randeffekte hervorgerufen.

Direkt über der Öffnung ist der Ordnungsparameter mit $S \approx 0,75$ sehr hoch. Wenn hier Teilchen auftreten, zeigen diese in Richtung des Lochs nach unten und damit sehr viele in die gleiche Richtung. Im restlichen Bereich der Öffnung, Gebiet 5, liegt der Ordnungsparameter etwas geringer als im mittleren Teil der Silos. Hier sind in einigen Tomogrammen sehr wenig Stäbchen vorhanden, da der Dom erst weiter oben und weiter außen, neben der Öffnung, endet. Der Öffnungsradius ist mit einem schwarzen Dreieck in der Abbildung gekennzeichnet. Die Stäbchen auf dem Boden liegen hier zufällig verteilt, jedoch flach. Partikel weiter oben zeigen eher in das Loch hinein.

Am Rand, ab einer Entfernung zum Mittelpunkt von 8 cm, liegt erneut eine sehr hohe Ordnung vor. Die Stäbchen orientieren sich jedoch nicht entlang der Außenwand des Containers, wie man es nach [10, 116] erwarten könnte. In der Literatur legen sich die Teilchen mit ihrer langen Achse parallel zur Silowand. Der Unterschied zwischen diesen Experimenten und dem hier verwendeten Silo ist die Größe des Systems, verglichen mit den Teilchenabmessungen. Das Verhältnis ist bei den hier gezeigten Experimenten größer. Viele Stäbchen liegen relativ flach, was durch das Einfüllen bedingt sein kann. Für die zwei andere untersuchten Materialien, Dübel Q3 und Q2, ist der Ordnungsparameter nahe der Containerwand gering, vergleiche Anhang A.5. Hier liegen einige Teilchen flach und andere richten sich an der Wand aus, so dass ein mittlerer Winkel resultiert.

Die Ordnungsparameter lassen vermuten, dass der breite Bereich des bewegten Granulats, vergleiche Abbildung 3.33, geschert wird, da sie im kompletten Gebiet erhöht sind. Hier wäre es sehr interessant Messungen mit geringen Ausflussmengen vorzunehmen. Damit könnte diese These anhand von Partikelverfolgung überprüft werden.

Die Ordnungsparameter können im fließenden Bereich vor allem für die größeren Teilchen sehr gut bestimmt werden, da die Partikeldetektion dort sehr gut funktioniert. Ca. 1 % der Partikel wird nicht automatisch gefunden. Die Ausrichtungsbestimmung der Teilchen kann Fehler von bis zu 2° aufweisen. Damit ist die Berechnung des Ordnungsparameters sehr genau. In

der Nähe der Containerwände ist die Detektion schlechter. Hier werden ca. 95 % der Teilchen gefunden. Damit sinkt dort die Güte des Ordnungsparameters. In der Mitte des Silos liegen weniger Teilchen als weiter außen vor, da das Volumen kleiner ist. Damit sind die Mittelwerte hier am ungenauesten.

Zur näheren Untersuchung der Ausrichtung werden fünf Bereiche, teils bereits weiter oben erwähnt, stellvertretend genauer betrachtet. Zum einen wird ein Bereich mit hohem Ordnungsparameter von $S \approx 0,7$ in der Höhe 4,5 cm bis 6 cm in der Mitte des Silos gewählt. Die folgenden Bereiche schließen sich in horizontaler Richtung auf der Höhe 4,5 cm bis 6 cm an. Ersteres liegt in der Entfernung 2,5 cm bis 4,5 cm zur Symmetrieachse des Silos. Das 3. Gebiet liegt zwischen 4,5 cm und 6,5 cm und das 4. zwischen 6,5 cm bis 8 cm vom Mittelpunkt entfernt. Als letzter Bereich wird das Gebiet an der Siloöffnung studiert. Die Höhe im Silo, vom Boden aus betrachtet, ist 0 cm bis 1,5 cm. Die Bereiche sind mit Nummern in Abbildung 3.34 markiert.

In Abbildung 3.35 werden die Winkelverteilungen der fünf Bereiche gezeigt. Die eingezeichnete rosa Linie stellt die Gleichverteilung des Ausrichtungswinkels ϑ dar. Es wird beachtet, dass die Partikel nur in einer Position den Winkel Null einnehmen können. Dabei würde ein Stäbchen senkrecht stehen. Es gibt mehrere Möglichkeiten Winkel verschieden von Null zu erreichen. Zum Beispiel wird der Winkel $\vartheta = 90^\circ$ von allen Teilchen, die flach auf dem Boden liegen, eingenommen. Die rosa Kurven stellen Sinusfunktionen dar.

Für das am stärksten geordnete Gebiet (Gebiet 1) ist eine eindeutige Ausrichtung am Fluss erkennbar. Es ist eine klare Abweichung von der Gleichverteilung zu sehen. Viele Teilchen weisen einen Winkel um ca. 20° auf. Die Partikel zeigen nicht direkt in die senkrechte Richtung. Sie orientieren sich unter einem kleinen Winkel am Fluss. Da der Winkel für die Untersuchung in der Scherzelle geringer ist [57] als der hier zur Vertikalen gemessene, kann diese Ausrichtung ein Indiz sein, dass der Fluss nicht rein nach unten, sondern leicht nach innen verläuft. Dies kann außerdem auch angenommen werden, da die äußeren Gebiete auch durch das unten in der Mitte gelegene Loch ausfließen. Dabei muss das Granulat über die Höhe des Silos in die Mitte des Silos transportiert werden.

Gebiet 2 zeigt eine leichte Abweichung von der Gleichverteilung. Hier gibt es im Vergleich zu Gebiet 1 mehr Teilchen, die kleine Winkel zur Grenze zwischen bewegtem und unbewegtem Gebiet haben. Der Winkel zwischen fließender und stehender Schicht α beträgt ca. 33° . Dieser kann aus Abbildung 3.34 ermittelt werden. Hierzu wird der türkisfarbene Bereich in Abbildung 3.33, der für alle Partikelarten ähnlich ist, als Abgrenzung zwischen den Schichten genommen. Es entsteht ein rechtwinkliges Dreieck mit den Kathetenlängen 7 cm und 11 cm. Über den Arkustangens ist der Winkel α bestimmbar. Die Flussrichtung in dieser Region wird parallel zu dieser Grenze liegen. Damit nehmen die Stäbchen im Mittel einen größeren Winkel zur Vertikalen, aber einen kleinen Winkel zu $\alpha \approx 33^\circ$ ein. Auch große Winkel um 70° bzw. 80° werden häufig angenommen. Hier könnte die Ausrichtung der Teilchen noch nicht vollständig abgeschlossen sein. Längere Experimente mit größerem Materialausfluss könnten dies überprüfen.

Gebiet 3 zeigt eine deutliche Verschiebung der Winkel hin zu hohen Winkeln um 75° . Es kann davon ausgegangen werden, dass hier fast keine Scherung, die zur Ausrichtung führen würde, stattfindet. Damit stellt Gebiet 2 ein Grenzbereich zwischen starker Ausrichtung in Flussrichtung und unausgerichtetem Material dar.

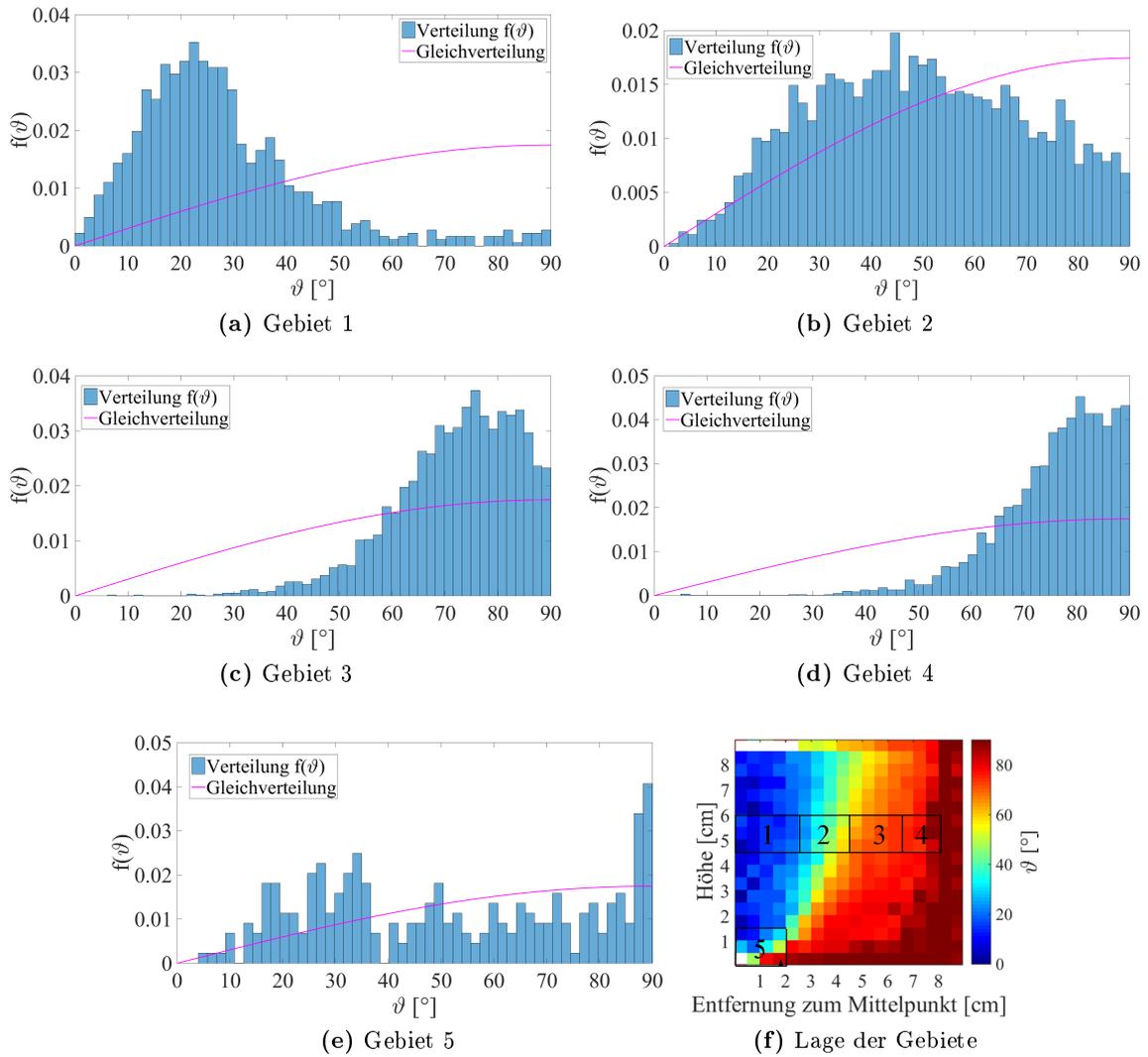


Abbildung 3.35: (a-e) Winkelverteilungsfunktionen von ϑ für Partikel der Gebiete 1 bis 5 für Dübel Q5 in einem Silo mit Öffnungsdurchmesser $d = 3,7$ cm. Die rosa Linien stellen die Gleichverteilung des Winkels, hier eine Sinusfunktion, dar. (f) Lage der verwendeten Gebiete, vergleiche Abbildung 3.34

Das vierte Gebiet zeigt erneut keine Gleichverteilung. Hier sind große Winkel, also Teilchen, die nahezu flach liegen, überrepräsentiert. Da der betrachtete Bereich weit genug vom Rand entfernt ist, könnte es ein Einfülleeffekt sein, da sich die Stäbchen im untersuchten Gebiet nur gering bewegen. Es ist kein Einfüllen möglich, das völlig unausgerichtete Teilchen hinterlässt, vergleiche [24]. Die Stäbchen richten sich bei Fluss in das Silo schon in bestimmter Weise aus. Hier legen sich die Partikel waagrecht.

Für das letzte Gebiet, direkt über der Öffnung, liegt annähernd eine Gleichverteilung vor. Hier zeigen die Teilchen aus allen Richtungen in das Loch. Das Maximum bei 90° resultiert aus Randeffekten. Am Boden liegen die Teilchen in ein bis zwei Lagen parallel zu ihm.

Die Verteilungen sind nicht so glatt wie die der Untersuchung in der Scherzelle, da nur 30 Experimente durchgeführt wurden. Dadurch fließen die Orientierungen weniger Teilchen ein. Der Trend der Ausrichtung ist gut erkennbar. Für eine bessere Statistik sollten mehr Experimente durchgeführt werden. Damit würden sich nicht nur die Winkelverteilungen glätten, sondern es könnten auch die Mittelwerte und Ordnungsparameter genauer bestimmt werden. Zum Rand des Silos werden es mehr Teilchen, da das betrachtete Volumen größer wird. Dort werden Verteilungen glatter.

Die Höhenabhängigkeit der Winkelverteilung von ϑ des inneren Teils des fließenden Gebiets (Entfernung zur Symmetrieachse des Silos: 0 cm bis 2 cm) wird in Abbildung 3.36 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung für die Höhe von ca. 1 cm bis 6 cm annähernd gleich bleibt. Hier hat sich ein stationärer Zustand ausgebildet. Eine weitere Ausrichtung findet in diesem Silo nicht statt. Die Verteilung weicht jedoch leicht von der in der Split-Bottom-Geometrie ab. Der mittlere Winkel ist etwas höher und die Verteilung geringfügig breiter. Der Endzustand der Split-Bottom-Geometrie wird im Silo nicht erreicht, da die auftretende Scherverformung zu gering ist. Außerdem verläuft der Fluss vermutlich nicht völlig vertikal, sondern leicht nach innen geneigt. Die Ausrichtung kann daher von der in einer einfachen Scherströmung abweichen. Weiter oben im Silo (über der Höhe von 6 cm) steigt der mittlere Winkel und die Verteilung wird breiter. Hier wurden die Teilchen weniger geschert und haben sich daher weniger ausgerichtet. Dieser Zustand ist vergleichbar mit dem Einlauf ins Gleichgewicht aus dem unausgerichteten Zustand in der Split-Bottom-Zelle. Im weiteren Verlauf werde die Teilchen zur Reibungsminimierung ihre Ordnung weiter erhöhen. Nahe des Silobodens ist die Verteilung sehr breit. Dies ist ein Randeffect, da einige Partikel hier nicht fließen, sondern ihre Anfangsausrichtung beibehalten.

Für andere Materialien und Öffnungsradien werden die Ordnungsparameter und die mittleren Winkel zwischen Vertikale und Teilchenachse für verschiedene Bereiche in Tabelle 3.3 und 3.4 angegeben. Es werden erneut die fünf betrachteten Bereiche beleuchtet. Die Messfehler des Ordnungsparameters ergeben sich aus der Partikeldetektion. Die Teilchen können eine leicht andere Ausrichtung als die ermittelte aufweisen. Damit kann der Fehler der Ordnungsparameters auf $\pm 0,02$ abgeschätzt werden.

In der Mitte des gescherten Bereichs liegt hohe Ordnung vor, wie an den hohen Ordnungsparametern des Gebiets 1 zu erkennen ist. Für die Dübelsorten Q3 und Q5 liegen die Werte für S um 0,55 oder höher. Die maximale Ordnung tritt für Dübel Q5 beim größten Öffnungsradius auf. Hier fließen die Teilchen sehr gut aus und werden somit durch den Fluss geordnet. Die Ordnungsparameter liegen damit nur knapp unter den Ordnungsparametern, die in der Split-Bottom-Scherzelle erreicht werden. Für die Dübel Q2 tritt ein geringer Ordnungsparameter von 0,25 auf. Hier unterscheiden sich Längs- und Querrichtung nicht sehr stark, so dass

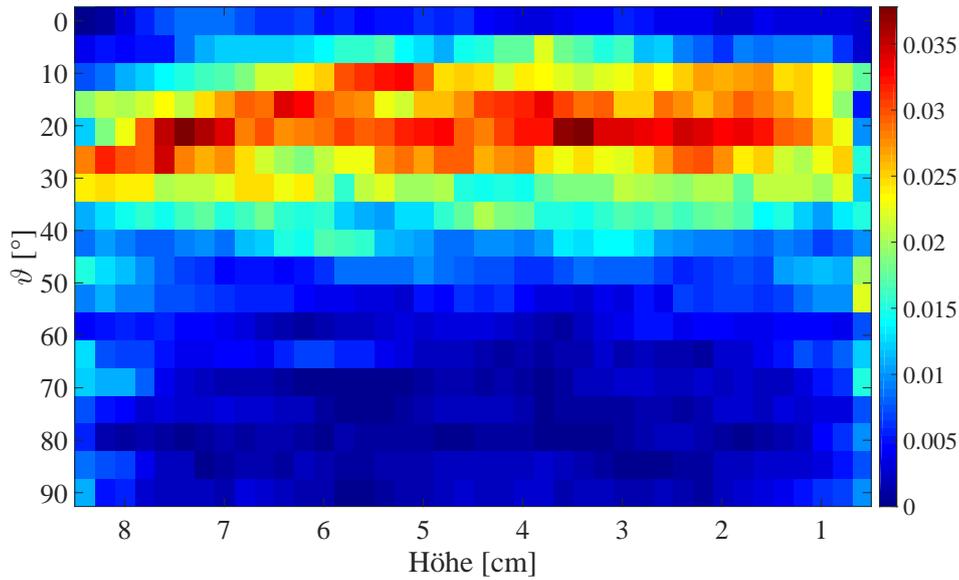


Abbildung 3.36: Verteilung von ϑ in Abhängigkeit der Höhe für eine Entfernung zur Symmetrieachse des Silos von 0 cm bis 2 cm. Ermittelt wurde die Verteilung für jede Höhe je aus den Partikeldata einer 1 cm hohen Schicht. Die Zahlenwerte der Farbskala entsprechen der relativen Anzahl der Teilchen mit entsprechendem Winkel im betrachteten Bereich geteilt durch die Winkelintervallbreite.

die Ausrichtung geringer ausfällt, bzw. das Material zwei Vorzugsrichtungen aufweisen kann. Dieser Effekt wurde von Börzsönyi et al. in [58] beschrieben.

Der Ordnungsparameter der Dübel Q8 ist ebenfalls sehr gering. Da die Partikel sehr groß im Verhältnis zu den Containerabmessungen sind und der Ausfluss nur sehr gering ist, liegt nur geringe Ordnung vor. Damit könnten sich die sehr langen Teilchen noch nicht völlig in ihre Vorzugsrichtung gedreht haben. Kleinere Partikel legen beim Ausfließen eines halben Silos mehr Teilchenlängen zurück.

Die Winkel der Dübel in Gebiet 1 sind geringer als der Winkel zwischen bewegtem und unbewegtem Gebiet. Der Winkel $\alpha \approx 33^\circ$ wurde in der Diskussion der Dübel Q5 in einem Silo mit Öffnungsdurchmesser von 37 mm ermittelt. Die Teilchen zeigen deutlicher zur Siloöffnung. Sie nehmen einen geringen Winkel zum Fluss ein. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Strömung vertikal nach unten verläuft, sind die Ausrichtungswinkel hier etwas höher als in der Split-Bottom-Zelle. Dies könnte dadurch bedingt sein, dass der stationäre Zustand noch nicht erreicht ist.

Die Linsen weisen ebenfalls nur einen sehr geringen Wert für S auf. Diese Teilchen sind im Vergleich zu den Dübeln und zum Container relativ groß und abgerundet, so dass sie eine geringere Tendenz zur Ordnung zeigen. Außerdem stellen sich die Linsen im Scherfluss der modifizierten Couette-Zelle auf. Analog könnten sie hier versuchen ihre langen Achsen so zu stellen, dass diese in die Mitte des Silos zeigen, oder jeweils entlang einer Tangente eines Rings um die Symmetrieachse des Silos. Zu sehen ist die Ausrichtung der Teilchen in Abbildung 3.37. Es ist ein Schnitt durch ein Tomogramm eines verstopften Silos mit Linsen dargestellt. Die Linsen an den Rändern der bewegten Schicht orientieren sich unter kleinem Winkel an diesem. In der Mitte des Silos liegen die Teilchen eher zufällig geordnet. Die Verteilung des Winkels ϑ , ermittelt aus Experimenten, wird in Abbildung 3.38 gezeigt. Es ist zu erkennen, dass fast eine Gleichverteilung vorliegt. Winkel zwischen 20° und 50° treten jedoch leicht häufiger als

Tabelle 3.3: Ordnungsparameter für verschiedene Gebiete im Silo für unterschiedliche Materialien. Für die Werte wird ein Fehler von $\pm 0,02$ abgeschätzt.

Gebiet	1	2	3	4	5
Dübel Q5, d = 33 mm	0,55	0,31	0,15	0,23	0,19
Dübel Q5, d = 35 mm	0,68	0,50	0,43	0,20	0,29
Dübel Q5, d = 37 mm	0,70	0,51	0,44	0,25	0,29
Dübel Q5, d = 41 mm	0,73	0,72	0,54	0,36	0,60
Dübel Q8, d = 64 mm	0,31	0,48	0,36	0,57	0,31
Dübel Q3, d = 35 mm	0,57	0,47	0,28	0,12	0,26
Dübel Q2, d = 30 mm	0,25	0,23	0,14	0,07	0,31
Linsen, d = 35 mm	0,20	0,21	0,21	0,10	0,20

Tabelle 3.4: $\vartheta \pm (\sigma_\vartheta + \tilde{\sigma}_\vartheta)$ für verschiedene Gebiete im Silo für unterschiedliche Materialien, ermittelt aus dem Eigenvektor zum größten Eigenwert des Ordnungstensors. σ_ϑ - Standardabweichung, $\tilde{\sigma}_\vartheta$ - abgeschätzter Fehler, im Bereich von 3° . Der überwiegende Teil von $(\sigma_\vartheta + \tilde{\sigma}_\vartheta)$ entspricht der Standardabweichung

Gebiet	1	2	3	4	5
Dübel Q5, d = 33 mm	$17^\circ \pm 18^\circ$	$43^\circ \pm 23^\circ$	$69^\circ \pm 14^\circ$	$78^\circ \pm 12^\circ$	$50^\circ \pm 27^\circ$
Dübel Q5, d = 35 mm	$15^\circ \pm 22^\circ$	$34^\circ \pm 25^\circ$	$80^\circ \pm 22^\circ$	$88^\circ \pm 21^\circ$	$40^\circ \pm 27^\circ$
Dübel Q5, d = 37 mm	$14^\circ \pm 18^\circ$	$39^\circ \pm 23^\circ$	$69^\circ \pm 14^\circ$	$75^\circ \pm 12^\circ$	$32^\circ \pm 27^\circ$
Dübel Q5, d = 41 mm	$15^\circ \pm 17^\circ$	$22^\circ \pm 19^\circ$	$65^\circ \pm 17^\circ$	$76^\circ \pm 13^\circ$	$22^\circ \pm 21^\circ$
Dübel Q8, d = 64 mm	$27^\circ \pm 22^\circ$	$61^\circ \pm 18^\circ$	$70^\circ \pm 13^\circ$	$88^\circ \pm 11^\circ$	$69^\circ \pm 25^\circ$
Dübel Q3, d = 35 mm	$19^\circ \pm 20^\circ$	$40^\circ \pm 22^\circ$	$64^\circ \pm 21^\circ$	$82^\circ \pm 22^\circ$	$33^\circ \pm 30^\circ$
Dübel Q2, d = 30 mm	$24^\circ \pm 26^\circ$	$45^\circ \pm 24^\circ$	$76^\circ \pm 21^\circ$	$83^\circ \pm 21^\circ$	$85^\circ \pm 9^\circ$
Linsen, d = 35 mm	$32^\circ \pm 23^\circ$	$44^\circ \pm 20^\circ$	$52^\circ \pm 19^\circ$	$86^\circ \pm 21^\circ$	$49^\circ \pm 22^\circ$

in einer Gleichverteilung auf. Einige Teilchen werden durch den Fluss unter einem kleinen Winkel in Fließrichtung gedreht.

Der erhöhte Winkel für Linsen ergibt sich aus der anderen Form der Teilchen. Es wird der Winkel zur kürzesten Achse betrachtet. Des Weiteren liegt eine sehr breite Verteilung und eine geringe Ordnung vor, so dass ein mittlerer Winkel wenig aussagekräftig ist.

Gebiet 2 zeigt eine geringe Ordnung für fast alle Materialien. Lediglich für die größte Öffnung von 41 mm bei Dübeln Q5 tritt eine sehr hohe Ordnung, mit $S = 0,72$, und geringer Winkel auf. Hier liegt durch den großen Durchmesser noch nicht der Grenzbereich zwischen fließendem und stehendem Gebiet, sondern noch die fließende Schicht vor. Der Ordnungsparameter fällt erst weiter außen ab.

Für Linsen zeigt sich ein leicht erhöhter Ordnungsparameter, wie auch im Anhang in Abbildung A.4 zu erkennen ist. Die Winkelverteilung ist rechts in Abbildung 3.38 zu erkennen. Die Teilchen weisen hier einen mittleren Winkel von 44° auf. Ein in die Abbildung eingesetztes Bild kennzeichnet den mittleren Winkel der Schokoladenlinsen im Vergleich zur Vertikalen und zur Grenze zwischen bewegter und fließender Schicht. Es zeigt sich, dass der Winkel zur anzunehm-

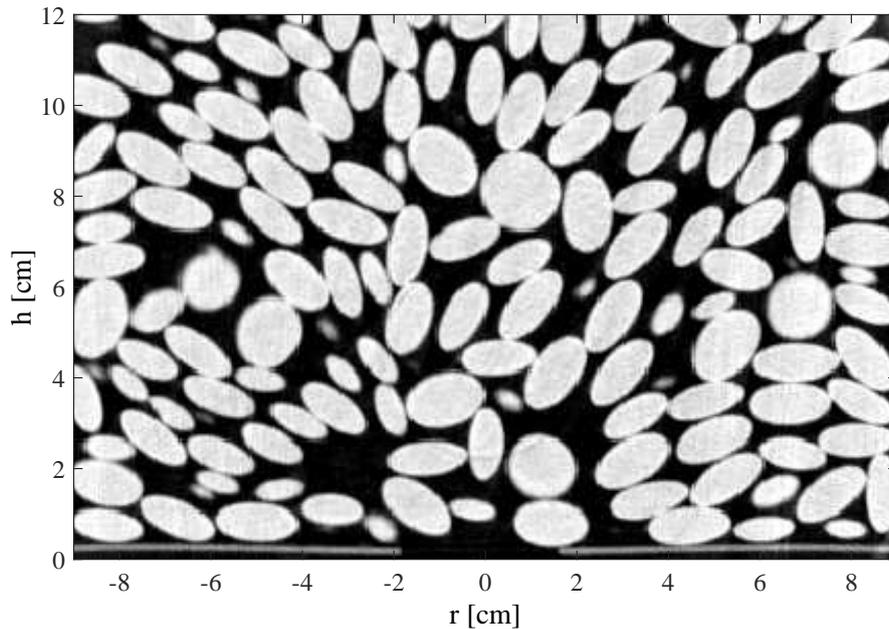


Abbildung 3.37: Schnitt durch ein Tomogramm von Linsen im nahezu zylinderförmigen Silo, zur Veranschaulichung der Ausrichtung von Linsen

menden Scherrichtung, der Grenze zwischen den Schichten, $\vartheta_{\text{scher}} = 33^\circ + \vartheta_{\text{av}} = 33^\circ + 44^\circ = 77^\circ$ ist. Dieser Winkel liegt nur leicht höher als der in der Scherzone in der Split-Bottom-Zelle (64°). Da hier, gerade in den weiter außen liegenden Gebieten, vermutlich noch nicht der stationäre Zustand erreicht ist, sind die Ergebnisse aus beiden Aufbauten vergleichbar.

In den übrigen drei Gebieten gleicher Höhe liegen Ordnungsparameter zwischen 0,1 und rund 0,5 vor. Für diese Bereiche werden bei der Berechnung über Formel 2.3 negative Ordnungsparameter gefunden. Die Teilchen sind also ungeordnet bis flaschenbürstenborstenförmig angeordnet. Der Trend für die unterschiedlichen Materialien und Öffnungsgrößen ist ähnlich zum oben diskutierten für Dübel Q5 bei einem Öffnungsdurchmesser von 37 mm. Als Besonderheit sind die hohen Ordnungsparameter der Dübel Q8 in den Bereichen 3 und 4 hervorzuheben. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einem großen Öffnungsdurchmesser von 64 mm die fließende Zone noch in diesen Gebieten vorliegt.

Dübel des Gebiets 3 und 4 liegen recht flach. Dies könnte, wie oben für die Dübel Q5 diskutiert, einfüllbedingt sein. Linsen zeigen hier mit einer langen Achse zum Ausfluss. Die Ausrichtung durch Scherung dieser vergleichsweise großen Teilchen kann auch in den Randbereichen vorhanden sein. Es kann jedoch auch ein Effekt des Einfüllens sein.

In Gebiet 5 tendieren die Dübel am Boden dazu relativ flach zu liegen, die Teilchen weiter oben zeigen in die Siloöffnung. Die Linsen zeigen fast eine Gleichverteilung aller Winkel.

Die Standardabweichungen liegen hier höher als die der Winkel im Split-Bottom-Container, da eine geringere Ordnung ausgebildet wird und weniger Teilchen betrachtet werden. Dies ist durch die geringere Anzahl an Messungen des stationären Zustands und einen kleineren Aufbau und daher weniger Teilchen im jeweils betrachteten Gebiet, verursacht.

Insgesamt weisen die Linsen einen größeren statistischen Fehler auf, da sie größer sind und somit jeweils weniger Teilchen als bei den Dübeln betrachtet werden.

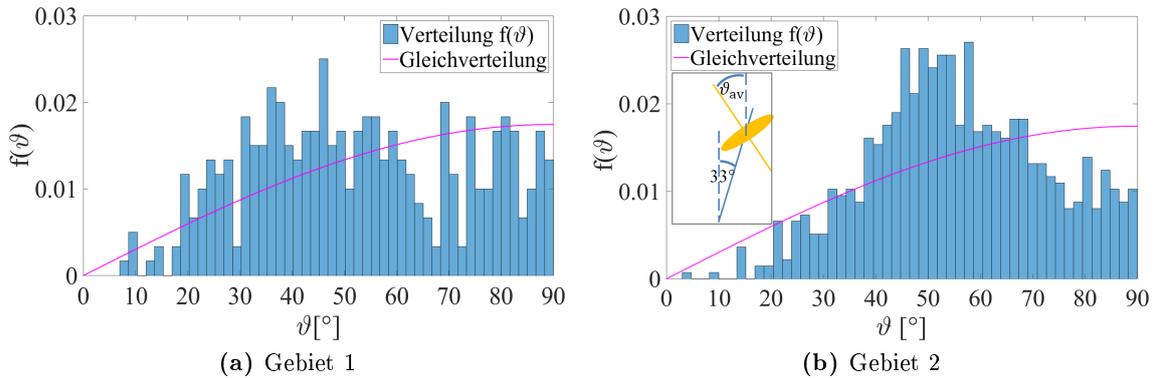


Abbildung 3.38: Winkelverteilungsfunktionen von ϑ für Linsen im Gebiet 1 und 2, gekennzeichnet in Abbildung 3.34 in einem Silo mit Öffnungsdurchmesser $d = 3,5$ cm. Die rosa Linien stellen die Gleichverteilung des Winkels, hier eine Sinusfunktion, dar. Die Skizze im rechten Bild stellt die Winkelverhältnisse der Linsen in Bezug auf die Vertikale (gestrichelt) und die Grenze zwischen fließender und stehender Schicht (durchgehende blaue Linie) dar.

3.2.2 Packungsdichten

Die Packungsdichten verschiedener Materialien werden im zylinderförmigen Silo nach spontaner Verstopfung betrachtet. Sie sind in Abbildung 3.39 angegeben.

Für drei verschiedene Dübelgrößen, Q5, Q3 und Q2, liegen Packungsdichtebilder für verschiedene Öffnungsdurchmesser vor. Im nicht ausfließenden Bereich, hier in den vorliegenden Bildern jeweils auf die rechte untere Ecke projiziert, ergibt sich für jede Dübelart eine konstante Packungsdichte. Diese steigt zu Dübeln mit kleinerem Aspektverhältnis hin an. Für Dübel Q5 liegt die Dichte bei ca. 0,54, für Q3 bei 0,58 und für die kleinsten Dübel Q2 bei 0,6. Dies stimmt etwa mit den Ergebnissen von Zhang [34], vergleiche Kapitel 1.2, überein. Für die Dübel Q8 wird im nicht bewegten Bereich eine Packungsdichte von ca. 0,46 ermittelt. Dies liegt ebenfalls nah an der von Zhang ermittelten Kurve. Die drei Dübelarten mit abgerundeten Kanten (Q8, Q5, Q3) liegen dabei leicht über den Werten der Literatur. Durch ihre leicht abgerundete Form können sie besser packen. Die eckigen Stäbchen Q2 zeigen im Vergleich zur Literatur ähnliche bis leicht geringere Dichten. Linsen zeigen eine Dichte von 0,63 und Erbsen eine von 0,6. Damit liegt diese Dichte leicht unter der einer losen Zufallspackung für Kugeln von 0,64. Erbsen stellen keine perfekten Kugeln dar. Sie unterscheiden sich zum einen in der Form geringfügig von Kugeln, damit weisen sie laut Abbildung 1.2 eine geringere Packungsdichte auf und zum anderen unterscheiden sie sich leicht in ihrer Größe. Der Effekt, dass polydisperse Kugeln besser packen, siehe z.B. [117], kommt daher nicht zum Tragen.

Lagenbildung ist für fast alle Materialien an den unteren und seitlichen Rändern des Silos zu erkennen. Die Lagen sind durch horizontale und vertikale Streifen höherer Dichte gekennzeichnet. Die Teilchen lagern sich parallel an den Wänden an. Die Abstände der Schichten liegen etwa bei einem Partikeldurchmesser und darunter. Die Lagen der Teilchen überlappen daher teilweise. Bei den Kombinationen Dübel Q3, Öffnungsdurchmesser $d=41$ mm, Q5, $d=37$ mm und $d=41$ mm sind kaum Lagen an der seitlichen Containerwand erkennbar. Hier liegen die Teilchen ungeordnet oder flach.

Dieser Effekt der Lagenbildung wurde auch in [10, 116] beschrieben. Nach Energiezufuhr sind zwei bis drei Lagen parallel zur Wand verlaufender Partikel erkennbar. Trotz der unterschied-

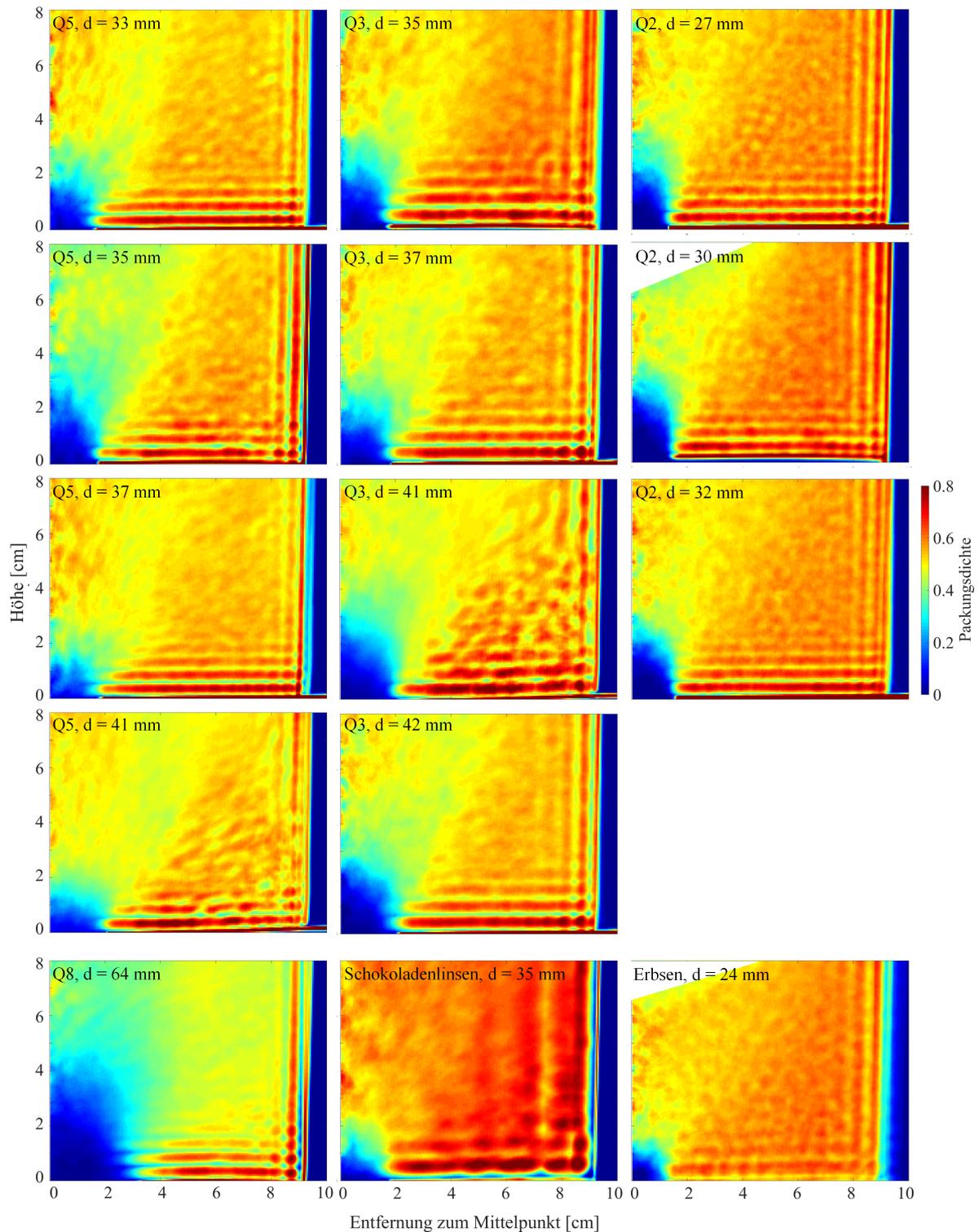


Abbildung 3.39: Packungsdichten verschiedener Materialien (Dübel Q8, Q5, Q3, Q2, Schokoladenlinsen und Erbsen) bzw. verschiedener Silo-Öffnungsgrößen (jeweils im Bild angegeben) in einem zylindrischen Silo. Dichte-Skala für alle Materialien bei Dübeln Q2 gezeigt.

lichen Abmessungen der Container im Vergleich zum Granulat tritt die Lagenbildung auch hier auf.

Außerdem zeigt sich im Silo bleibenden Teil eine körnige Struktur. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Teil in nahezu jedem Experiment für eine Sorte und eine Öffnung gleich ist. Das Mitteln über den Bereich reicht nicht aus, um eine völlig homogene Dichte zu berechnen.

Im ausfließenden Teil, der sich trichterförmig nach oben öffnet, ist die Packungsdichte für alle Materialien kleiner als im stehenden Teil. Vor allem an den Rändern des fließenden Gebiets ist die Packungsdichte verringert. Zur Mitte des Silos nimmt sie erneut zu, erreicht jedoch nicht den Wert des unbewegten Teils. Diese beiden Bereiche geringerer Dichte sind folgendermaßen zu erklären. Im gesamten gescherten Gebiet tritt Dilatanz auf und die Packungsdichte wird verringert. Der Verringerung tritt eine mögliche Packungsdichteerhöhung durch Ordnung der Teilchen, vergleiche vorheriges Kapitel, entgegen. Die Bereiche mit hoher Ordnung und geringem mittleren Winkel zur Vertikalen, siehe Abbildung 3.34, entsprechen denen mit geringer Packungsdichte. Die Dilatanzeffekte überwiegen dabei. Die Ordnung wird zur Mitte hin höher und kann Dilatanzeffekte besser aufwiegen.

Das Phänomen der Dichteverringering konnte auch schon in der Scherzelle beobachtet werden. Im Silo überwiegt ebenfalls die Packungsdichteverringering durch die Reynoldsdilatanz über eine mögliche Packungsdichteerhöhung durch Ordnung der Teilchen. Da die auftretende Ordnung hier geringer ist als in den Experimenten der Scherzelle, wurde eine Packungsdichteverringering erwartet.

Am unteren Ende, am Auslass des Silos, ist zu erkennen, dass die Packungsdichte um Null liegt. Dies ist durch die dreidimensionale Brückenbildung zu erklären. Die Teilchen bilden einen Dom beim Verstopfen. Somit sind in wenigen Aufnahmen Teilchen bzw. je nur eine geringe Anzahl an Partikeln vorhanden. An den dunkelblauen Bereich schließt sich ein Übergangsbereich an. In diesem sind öfter, aber nicht bei allen Experimenten, Teilchen vorhanden. Damit ergibt sich eine mittlere Packungsdichte.

Für Erbsen ist der Übergangsbereich zwischen Gebieten, in denen bei jedem Experiment Teilchen vorhanden sind und dem gebildeten Loch, am schärfsten. Der Dom ist immer ähnlich groß. Hier können auch keine Teilchen in das Loch hineinragen während sie von anderen gehalten werden. Dies tritt vor allem bei den längeren Dübeln auf, wie bereits in Abbildung 3.31 gezeigt wurde.

Die Schokoladenlinsen zeigen, verglichen mit ihrer Größe, ebenfalls ein sehr kleines Loch. Die abgerundeten Linsen verkanten nicht so einfach wie die Dübel. Im Tomogrammschnitt der Linsen, Abbildung 3.37, ist kaum ein Freiraum unter den Linsen erkennbar.

Für die Dübel Q8 ist der Dom sehr groß und zeigt einen weiten Übergangsbereich. Die Größe ist zum einen durch die große Siloöffnung, die für einen guten Ausfluss der Teilchen benötigt wird und zum anderen durch die Länge der Teilchen begründbar. Dadurch können sie sehr leicht verkanten und den weiteren Ausfluss stoppen. Der breite Übergangsbereich lässt sich dadurch erklären, dass verschiedene Experimente sehr unterschiedlich hohe Domformen zeigen. Nach dem Mitteln zeigt sich so über einen weiten Bereich hinweg eine mittlere Packungsdichte, da teils Partikel vorhanden sind und teils nicht. Außerdem können auch oberhalb nahe des Doms Lücken im Granulat durch das Verstopfen entstehen.

Über diesem Gebiet schließt sich dann das im nicht verstopften Zustand fließende Gebiet zu erkennen. Es lassen sich Packungsdichten von ca. 0,44 (Packungsdichte bei stationärem Scherfluss in der Split-Bottom-Zelle: 0,53 [118]) für Dübel Q5, 0,5 (0,53 [118]) für Q3 und Q2, 0,53 (0,54) für Erbsen, 0,56 (0,61) für Linsen und 0,39 für Dübel Q8 für den Bereich des vor

dem Verstopfen fließenden Granulats ablesen. Damit liegen die Packungsdichteverringerungen im Bereich zwischen 11 % und 18 %. Für die runden bzw. abgerundeten Teilchen, Erbsen und Linsen, sind sie am kleinsten. Verglichen mit dem stationären Scherfluss in der Split-Bottom-Zelle ([118], Kapitel 3.1.3) ergeben sich geringere Dichten, da hier eine kleinere Ordnung vorliegt und daher die Dilatanz weniger durch Ordnung der Teilchen aufgehoben wird.

Ein erneutes Abfallen der Packungsdichte zur Oberseite des Silos, wie es für Dübel Q2 mit Öffnungsdurchmesser 30 mm und geringfügig für Erbsen angedeutet ist, kann folgendermaßen erklärt werden. Das Material ist in einigen Tomografie-Aufnahmen so weit ausgeflossen, dass in der Höhe 8 cm keine Teilchen mehr vorliegen. Wird dies mit weiteren Tomogrammen gemittelt, bei denen dort noch Partikel sind, ergibt sich eine mittlere Packungsdichte, wie hier im Ansatz zu sehen ist. Daher wurde dieser Bereich ausgeschnitten, da er nicht realen Packungsdichten entspricht. In weiteren Experimenten ist dies unbedingt zu vermeiden. Dazu kann ein höheres Silo oder ein kontinuierlicher Granulatnachfluss verwendet werden. Die Höhe des Silos ist jedoch durch die Geometrie des Computertomografen eingeschränkt.

Wird der Bereich in dem eine geringere Packungsdichte vorliegt für wachsende Lochgrößen verglichen, ist erkennbar, dass dieser für die Dübel Q3 und Q2 immer breitere Bereiche einnimmt. Dies ist zum einen durch die breitere fließende Zone bei größerem Öffnungsradius erklärbar. Außerdem dehnt sich der Bereich kleinster Packungsdichte weiter nach oben aus. Dieser Trend setzt für die Dübel Q2 beim zweiten Öffnungsradius aus, da der oben beschriebene Fehler auftritt. Für die restlichen Messungen gilt, für kleine Öffnungen sind über einer Höhe von ca. 4 cm bei kleinen Radien nur geringe Packungsdichteänderungen gegen das stehende Material erkennbar. Mit zunehmender Lochgröße können die Teilchen besser ausfließen. Es entstehen längere und schneller abfließende Lawinen. Beim Verstopfen ist das Material dann nicht so dicht gepackt, wie wenn nur ein kleiner Teil des Granulats aus dem Silo entfernt wurde. Der Trend ist ebenfalls für drei der vier Öffnungen für Dübel Q5 erkennbar. Die Öffnung 35 mm fällt aus dem Muster, da im gesamten fließenden Material größere Lücken entstehen. Dadurch ist die gemittelte Packungsdichte geringer. Die Lücken entstehen bei dieser Experimentserie, denn zwischen den Lawinen wurde nicht wie bei anderen Experimenten der Fluss von unten durch die Siloöffnung durch einen kleinen Stoß angeregt. Hier wurde das Silo von außen angeschlagen. Damit kann zum einen eine Lawine ausgelöst werden, aber zum anderen wird das Material im ganzen Silo beeinflusst. Die Ausrichtung der Partikel kann geändert werden, so dass sie nicht mehr genau die Lage, die durch den Scherfluss hervorgerufen wurde, haben. Durch die geringere Ordnung wird dann die Dilatanz des gescherten Granulats weniger aufgehoben. Außerdem kann je nach Anschlagstärke das Granulat aufgelockert werden.

Für die Dübel Q8 tritt im untersuchten Bereich auf Grund des größten Aspektverhältnisses die größte Änderung der Packungsdichte auf. Diese länglichen Teilchen können durch Brückenbildung auch in oberen Schichten im Silo Hohlräume entstehen lassen. Wird über diese gemittelt, sinkt die Dichte.

Für Linsen und Erbsen ist ein ähnlicher Trend wie für die kleineren Lochgrößen bei den Dübeln Q2 und Q3 ersichtlich. Die Packungsdichte steigt nach oben hin etwas an, ist aber dennoch geringer als im stehenden Teil des Granulats. Hier sind die Packungsdichteunterschiede zwischen stehenden und fließenden Partikeln geringer als bei den länglichen Teilchen, da sie abgerundet sind und schlecht verkanten. Sie bilden daher weiter oben im Silo keine Brücken, die kurzzeitig ein Nachrutschen verhindern. Außerdem sinkt ihre Packungsdichte unter Scherung nicht stark, wie in Kapitel 3.1.3 erläutert.

Von der Mittellinie des Silos nach außen wird das gemittelte Volumen größer, somit die Statistiken und Packungsdichten genauer. Es wird nicht die Qualität der Packungsdichteabbil-

dungen der Split-Bottom-Zelle erreicht. Für den innersten halben Zentimeter treten oft große Abweichungen zu nahe gelegenen Gebieten auf, da nur ein geringes Volumen gemittelt wird. Die Packungsdichten sind hier ungenau und können mit weiteren Experimenten verbessert werden.

Für die Packung im Silo können nur Endzustände beim Verstopfen gezeigt werden, da Zwischenzustände auf Grund der Aufnahmezeit des Tomografen von 20 Sekunden und einer Datenverarbeitungszeit von weiteren 40 Sekunden nicht realisierbar sind. Denkbar wäre eine Aufnahme bei gerade auslaufendem Material. Dabei könnten keine einzelnen Partikel aufgelöst werden, jedoch zur Packungsdichteermittlung würde diese Methode ausreichen. Es muss aber gewährleistet sein, dass die ganze Zeit Material ausfließt. Um Lawinen von über 20 Sekunden zu erzeugen, könnten nur große Lochdurchmesser gewählt werden. Bei diesen tritt dann eventuell keine Verstopfung mehr auf. Werden Verstopfungszustände induziert, indem die Siloöffnung geschlossen wird, sind CT-Aufnahmen anfertigbar. Dabei sollte beachtet werden, dass der Zustand eventuell nicht der gleiche wie nach einer spontanen Verstopfung ist.

Auf die sich mit Lochdurchmesser und Material ändernde Form des Doms, wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Im Weiteren wird die Packungsdichte von Granulaten in anderen Siloformen, Trichter und sich verjüngendes Rohr, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.40 dargestellt. Hier werden nur Experimente für Partikel, die ausfließen und verstopfen gezeigt. Die Kidneybohnen verstopfen im Rohr beispielsweise nicht. Bei dem trichter- und dem rohrförmigen Silo fließen im Gegensatz zum nahezu zylinderförmigen alle Partikel aus.

An den Rändern beider Silotypen ist erneut eine Lagenstruktur ersichtlich. Sie ist gekennzeichnet durch die linienförmigen Erhöhungen der Packungsdichte. Es sind je nach Material eine oder bis zu drei parallel zur Wand verlaufende Lagen vorhanden. Besonders die kleinsten Dübel Q2 orientieren sich beim Rohr stark an der Begrenzung. Diese Konfiguration entspricht sehr gut den Größenverhältnissen aus den Publikationen [10, 116]. Es werden ähnlich viele Lagen gefunden. Die Abstände der Lagen liegen um einen Partikeldurchmesser. Für die Dübel liegen sie leicht darüber, für die andere Partikel leicht darunter. Die Dübel befinden sich also nicht alle bzw. perfekt parallel zu den Wänden. Sie ragen in das Silo hinein und damit ergibt sich ein etwas höherer Sichtabstand. Zur Verdeutlichung ist eine horizontale Tomogrammschicht für die Dübel Q3 für das rohrförmige Silo in Abbildung 3.41 dargestellt. Die Schicht entspricht einer Höhe von 3,7 cm in den Bildern der Abbildung 3.40. Die Schichten überlappen leicht bei den abgerundeten Materialien.

Für alle Dübel ist zu sehen, dass ihre langen Achsen eine Vorzugsrichtung in die Siloöffnung hinein haben. Je kürzer die Dübel werden, desto größer wird der Hohlraum unter den Teilchen an der Öffnung. Die kurzen Holzzyylinder können sich nicht mehr so gut gegenseitig durch Reibung halten, so dass hier nur Teilchen weiter oben zurückbleiben, um einen Dom zu bilden.

Im trichterförmigen Silo lassen sich leicht geringere Packungsdichten als im ausfließenden Gebiet des nahezu zylinderförmigen Silos ermitteln. Sie sind annähernd gleich für die kleinen Teilchen, wie Dübel Q2 und Erbsen. Durch das geringere Volumen des Trichters gegenüber dem nahezu zylinderförmigen Silo können die Teilchen auf Grund von Randeinflüssen nicht so dicht packen. Des Weiteren ordnen sich die Teilchen hier anders als im zylinderförmigen Silo. Sie liegen parallel zur Wand des Trichters und nicht unter einem kleinen Winkel. Damit zeigen sie direkter in das Loch. Durch diesen Rand wird eine andere Ordnung induziert, wodurch keine oder eine geringere Packungsdichteerhöhung durch Ordnung hervorgerufen wird.

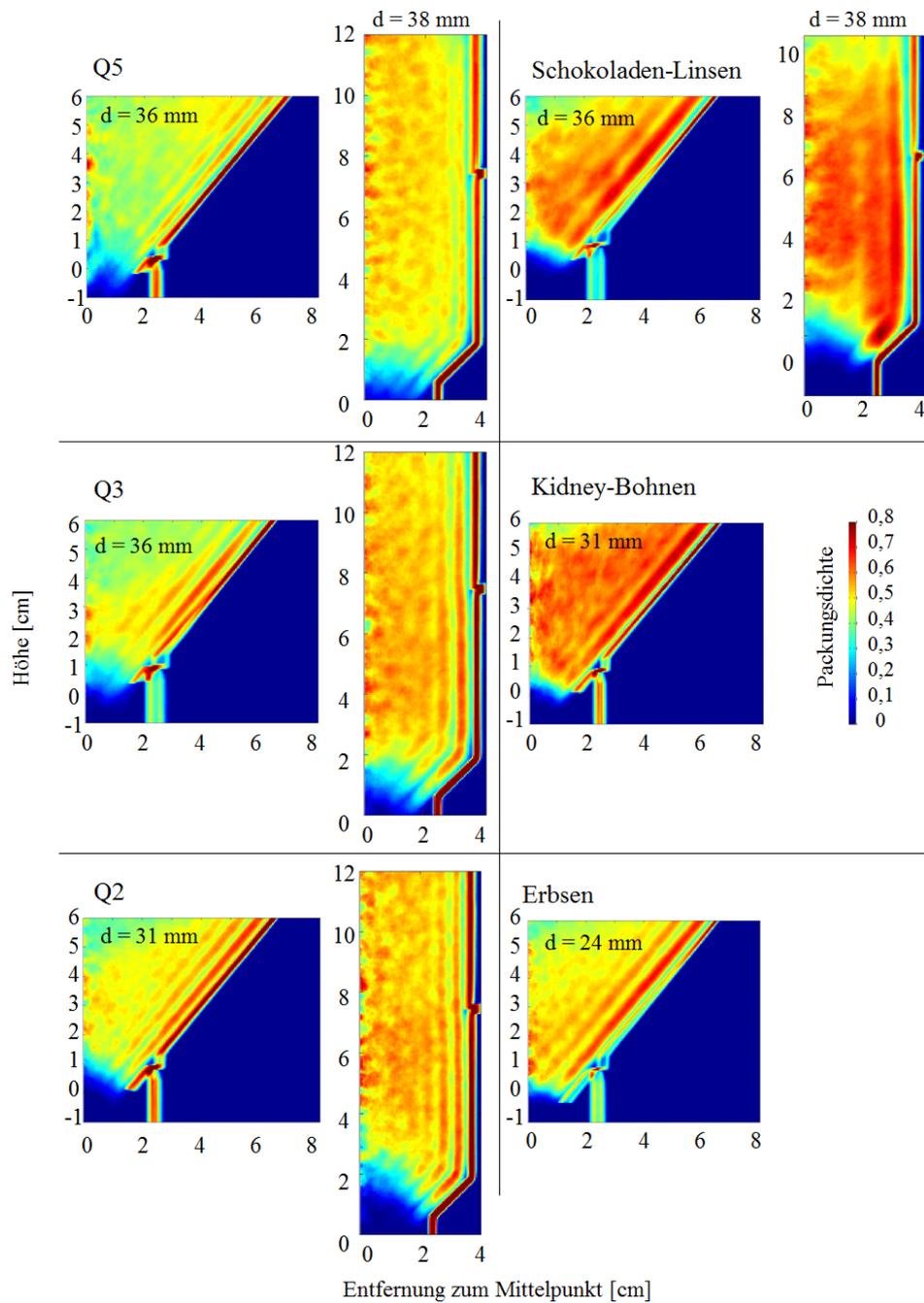


Abbildung 3.40: Packungsdichten verschiedener Materialien (Dübel Q5, Q3, Q2, Schokoladenlinsen, Erbsen und Kidneybohnen) für ein trichterförmiges (je links) und teils für ein rohrförmiges (je rechts) Silo (Öffnungsdurchmesser im Bild angegeben). Dichte-Skala für alle Materialien bei Bohnen gezeigt.

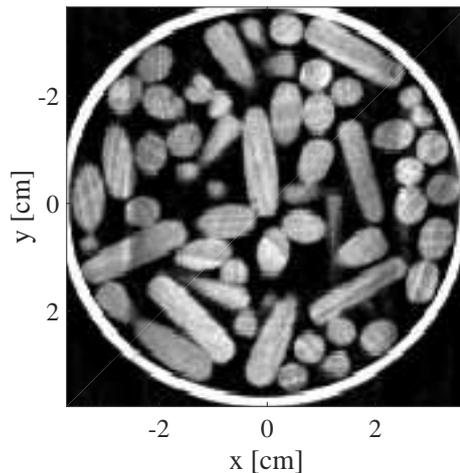


Abbildung 3.41: Horizontale Schicht eines Tomogramms der Dübel Q3 im röhrenförmigen Silo bei einer Höhe von 3,7 cm. Die Höhe wird, wie in Abbildung 3.40 angegeben, verwendet. Die Teilchen liegen nicht alle parallel zum Rand.

Für Bohnen liegt eine Packungsdichte von 0,61 vor. Das ist die höchste hier auftretende. Durch die abgerundete Form packen diese Teilchen gut. Insgesamt liegt die Dichte bei etwas geringeren Werten als im Split-Bottom-Scher-Container. Auch dies ist durch das kleinere Volumen begründbar.

Im oberen Bereich des Trichters tritt bei einigen Materialien eine Packungsdichteverringering auf. Diese ist, wie im nahezu zylinderförmigen Silo, ausflussbedingt. Bei einigen Experimenten sind hier keine Teilchen mehr vorhanden, so dass sich insgesamt eine reduzierte mittlere Packungsdichte ergibt.

Im röhrenförmigen Silo konnten für vier der verwendeten Materialien Verstopfungen erreicht werden. Auffällig ist, dass höhere Packungsdichten als im trichterförmigen und im fließenden Gebiet des nahezu zylinderförmigen Silos erreicht werden. Daher wird für ein Material die Ausrichtung der Teilchen betrachtet. Für die Dübel Q5 wird die Verteilung der Winkel zur vertikalen Achse in der Höhe von 10 - 60 mm und einem Radius von 0 - 30 mm in Abbildung 3.42 dargestellt.

Es ergibt sich ein mittlerer Winkel $\vartheta \pm \sigma_\vartheta$ von $75^\circ \pm 17^\circ$ und ein Ordnungsparameter von $S = 0,22$. Die Verteilung sieht für die untere und obere Hälfte des untersuchten Bereichs ähnlich aus. Viele Teilchen liegen flach und zeigen nicht zum Auslass des Silos. Die Verteilung ist der in Gebiet 4 des nahezu zylinderförmigen Silos sehr ähnlich. Da die Teilchen dort nicht fließen, kann vermutet werden, dass der innere Teil des röhrenförmigen Silos fast als Ganzes rutscht. Die Scherung wäre dabei nur in den Randbereichen lokalisiert. Dieses Phänomen würde auch auftreten, wenn der Ausfluss bis zum Messzeitpunkt zu gering war. Damit würden auch kein Scherfluss und (noch) keine Dilatanz vorliegen, was die höhere Packungsdichte rechtfertigt. Dies kann auf Grund mehrerer Messungen ausgeschlossen werden.

Für die Dübel Q2 und Q3 ergibt sich eine annähernde Gleichverteilung für ϑ . Die rosa Kurve der Winkelverteilungsbilder wird fast genau erreicht. Dies ist ebenfalls in Abbildung 3.42 dargestellt. Diese Ausrichtung ist größtenteils einfüllbedingt.

Problematisch ist der kleine Silodurchmesser. Bei diesen Radien liegt ein geringes Volumen zum Mitteln vor. Dadurch entsteht hier die auf den Packungsdichtebildern zu erkennende körnige Struktur. Zur Verbesserung der Mittelwerte sollten mehr Experimente durchgeführt werden. Außerdem hat der Rand einen Einfluss bis relativ weit in das Siloinnere hinein. Mit diesem Versuchsaufbau kann das generelle Verhalten von Granulaten in Silos nicht beschrieben werden. Der Einfluss von Randeffekten kann studiert werden.

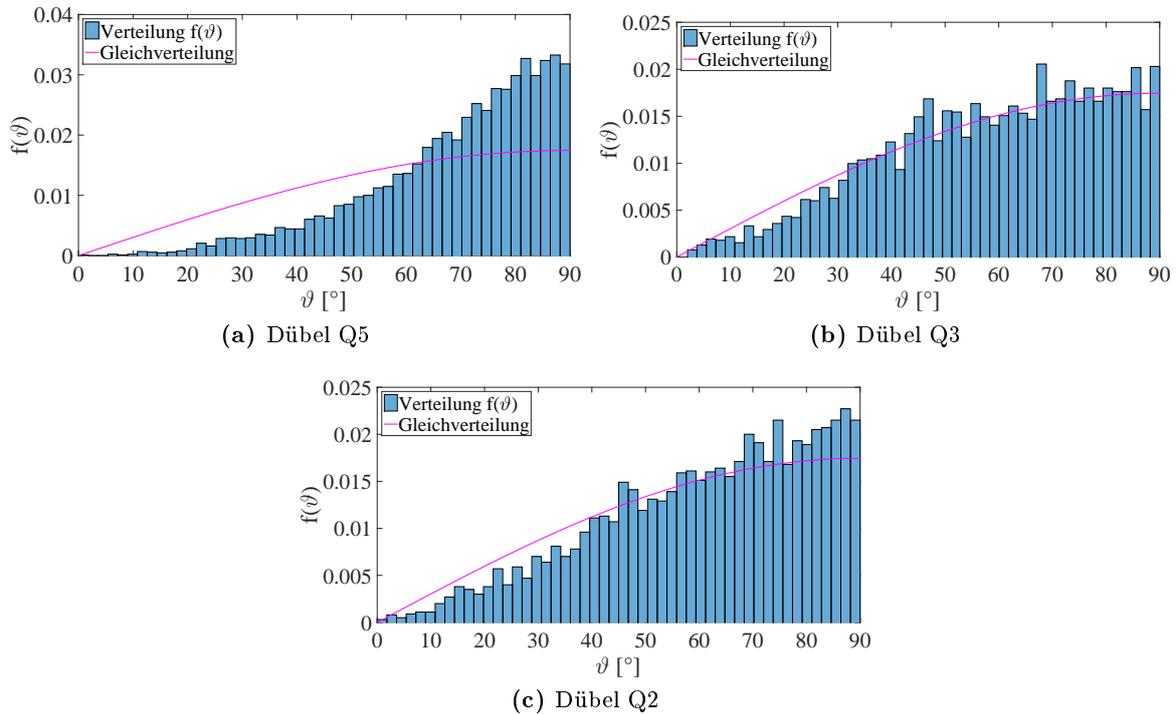


Abbildung 3.42: Winkelverteilungsfunktionen von ϑ , dem Winkel zur Vertikalen, für verschiedene Dübelgrößen im rohrförmigen Silo in der Höhe von 10 - 60 mm und einem Radius von 0 - 30 mm. Die rosa Linien stellen die Gleichverteilung des Winkels, hier eine Sinusfunktion, dar.

Für alle Packungsdichteberechnungen der verschiedenen Siloformen ist es auch hier nur möglich, relative Größen zu zeigen. Absolute Packungsdichten können aus denselben Gründen, wie bei den Experimenten im Split-Bottom-Scheraufbau, nicht ermittelt werden. Die Anfangsdichte entspricht nicht völlig einer Zufallspackung, vergleiche [24]. Ein geringer Fehler in der Wahl des schwarz-weiß-Schwellwerts ändert das Ergebnis leicht.

3.2.3 Dom

In diesem Abschnitt wird die, das Silo verstopfende, erste Lage von Partikeln näher untersucht. Dazu wird bestimmt, wie groß das gebildete Loch unterhalb der Teilchen ist. Des Weiteren wird die Anzahl der Partikel der ersten Lage für unterschiedliche Materialien für verschiedene Öffnungsgrößen bestimmt. Außerdem wird betrachtet, wie sich die verwendeten Granulate ausrichten.

Größe des Doms

Die gebildeten Domformen für verschiedene Materialien und Lochgrößen sind in den Abbildungen 3.43, 3.45 und 3.47 angegeben. Es wurde dafür in den verschiedenen Packungsdichtedarstellungen die Grenze gesucht, bei der jeweils die halbe Dichte der stehenden Zone unterschritten wird.

Für die größten Dübel Q8 wurde eine Lochgröße untersucht und der normierte Abstand der

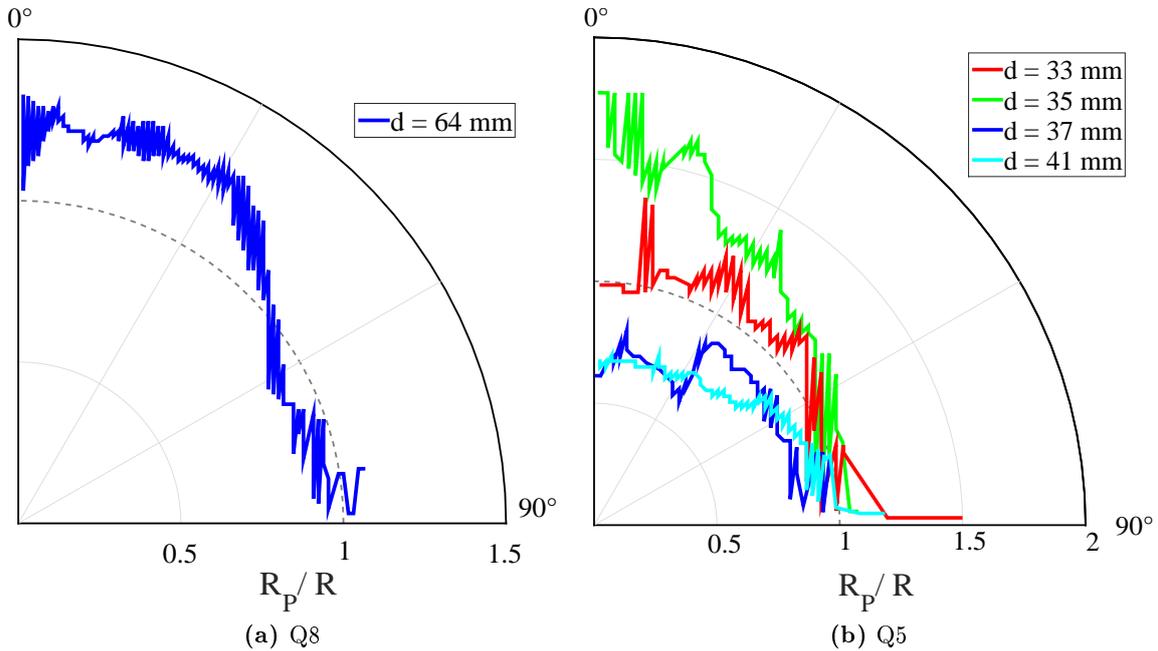


Abbildung 3.43: Domform für die Dübel Q8 und Q5 bei verschiedenen Silodurchmessern d , ermittelt aus Packungsdichteabbildungen des vorherigen Kapitels. In ihnen wird die Grenze gesucht, bei der jeweils die halbe Dichte der stehenden Zone unterschritten wird. Die Packungsdichtebilder wurden je aus der Mittelung von 30 Tomogrammen gewonnen. Dargestellt ist der Abstand der Partikel zur Siloöffnungsmitte R_P normiert auf den Siloradius R . Für $R_P/R = 1$ entspricht der Domradius dem Öffnungsradius des Silos.

Teilchen zum Auslass R_P/R , mit dem Abstand der Partikel zur Siloöffnungsmitte R_P und dem Siloradius R , in Abbildung 3.43 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die mittlere Materialoberfläche, die durch die Siloöffnung zu sehen ist, um einen Lochradius liegt. Der Viertelkreis mit $R_P = R$ ist mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet. Über den Winkelbereich von 0° bis ca. 45° , liegt die Grenze des Doms etwa bei $R_P/R \approx 1,2$. Die Stäbchen ragen nur teils in das Loch hinein und werden durch mit anderen Stäbchen gebildete Kraftketten gehalten. Für größere Winkel liegt die Grenze des Doms bei $0,8$ bis 1 normierten Radien. Am Boden des Silos können die Partikel je nach Experiment, vergleiche Abbildung 3.44, weit in das Loch hineinragen oder bei anderen Konfigurationen auf dem Rand oder etwas weiter außen enden. Die Partikel können auch in einem Experiment auf einer Seite des Silos weiter hineinragen als auf der anderen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Dübel am Boden flach liegen. Diese Möglichkeiten neben oder auf dem Rand endender Teilchen sind auch bei den anderen Dübelgrößen gegeben. Bei der Dübelart Q8 ist die Bestimmung der Domgröße mit einem großen Fehler behaftet, da sich ein weiterer Übergangsbereich in vertikaler Richtung ergibt. Im Packungsdichtebild ist über der Öffnung in der Höhe von 2 cm bis 4 cm eine mittlere Dichte zu sehen. Das heißt, dass in einigen Experimenten Dübel in dieses Gebiet hinein stehen und in anderen nicht. Mit einer Partikellänge von 4 cm kann dies durch einzelne Teilchen, die an einem Ende von anderen gehalten werden oder durch eine insgesamt tiefere Kuppel realisiert werden. Des Weiteren sind auch noch über dem Dom große Freiräume vorhanden, da durch die verkanteten Domteilchen die Lage nicht vollständig

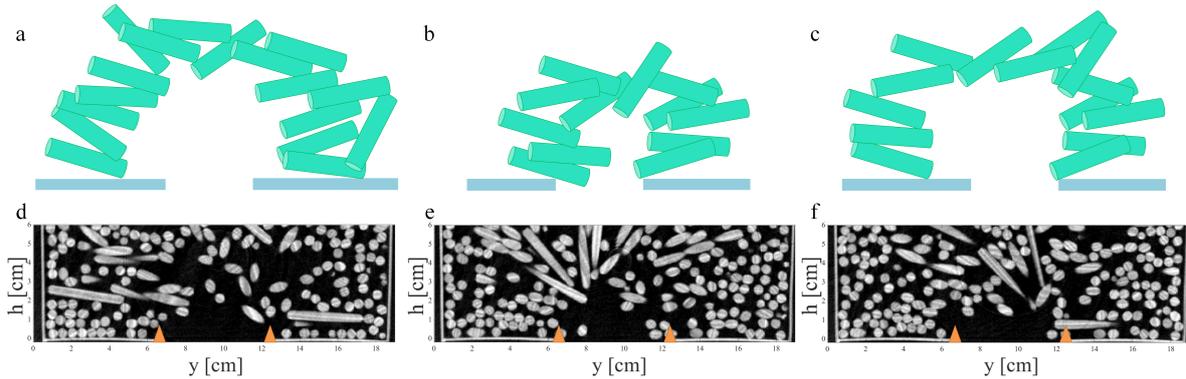


Abbildung 3.44: Mögliche Konfigurationen an der Öffnung des Silos. (a - c) Schematische Darstellungen der Anordnungen, (d - f) Tomogrammschichten verschiedener Experimente. Die Ränder der Siloöffnung werden mit orangenen Dreiecken verdeutlicht. (a, d) Partikel ragen nicht in die Siloöffnung hinein, sondern enden weiter innen. (b, e) Teilchen werden so vom umgebenden Granulat gehalten, dass sie in die Siloöffnung hineinragen können. (c, f) Mischform der vorherigen Konfigurationen.

mit Partikeln gefüllt wird. In Abbildung 3.44 sind recht flache Dome für die Dübel Q8 zu erkennen, die aber größere Hohlräume über dem Dom aufweisen.

Die Domgröße kann auch folgendermaßen bestimmt werden: Partikel der ersten Lage werden, wie im folgenden Kapitel über die Anzahl der Domteilchen, detektiert. Mit diesen wird dann die mittlere untere Grenze der ersten Teilchenschicht an der Siloöffnung bestimmt. Hier treten dieselben Probleme, dass die Schicht an sehr unterschiedlichen Stellen beginnt, auf. Außerdem kommt noch hinzu, dass durch die Lücken des Doms hintere Partikel gefunden werden und das Ergebnis damit ebenfalls verfälscht wird.

Für die Dübel Q5 wurden vier Lochdurchmesser untersucht. Für alle Öffnungsgrößen endet der Dom etwa auf dem Siloauslassrand. Die Höhe des Doms h_{Dom} unterscheidet sich stark für die verschiedenen Siloöffnungsdurchmesser. Es kann aber keine durchmesserabhängige Tendenz festgestellt werden, da gilt $h_{\text{Dom}, d = 35} > h_{\text{Dom}, d = 33} > h_{\text{Dom}, d = 37} \approx h_{\text{Dom}, d = 41}$. Auf Grund der Ähnlichkeit des Doms für die beiden größeren Öffnungen kann spekuliert werden, dass sich für Durchmesser mit größeren Granulatlawinen, also einem flüssigeren Ausfluss aus dem Silo, ein durchmesserunabhängiger Dom einstellt. Die Bestimmung dieser Domformen ist genauer als für die Dübel Q8, da der Übergangsbereich mittlerer Packungsdichten geringer ist. Hier treten die oben beschriebenen Effekte ebenso, aber weniger stark ausgeprägt, auf.

Im Weiteren wurde das Verhalten kleinerer Partikel studiert. Für Dübel Q3 ergibt sich die erste Darstellung aus Abbildung 3.45. Es wurden ebenfalls vier Lochdurchmesser untersucht. Die Partikelkuppeln enden alle im Mittel auf dem Siloöffnungsrand. Die Domform ist dabei im Rahmen von statistischen Schwankungen für alle Lochgrößen gleich. Der Dom ist leicht höher als breit. Der Fehler der Domgröße ist vergleichbar mit dem der Dübel Q5, da ähnliche Übergangsbereiche zwischen Freiraum unterhalb des Granulats und dem Vorliegen von Material in jedem Experiment vorhanden sind.

Die Domgrößen der Dübel Q2 sind im nächsten Diagramm der gleichen Abbildung dargestellt. Hier endet der Dom erneut für alle Siloöffnungen bei einem normierten Radius von 1 und die Domformen unterschieden sich kaum für verschieden große Öffnungen. Es zeigt sich eindeutig, dass der Dom bei dieser Partikelgröße höher als breit ist. Diese Teilchensorte ist sehr kurz und hat keine abgerundeten Kanten, so dass sich die Stäbchen nahe des Siloauslasses aufstellen

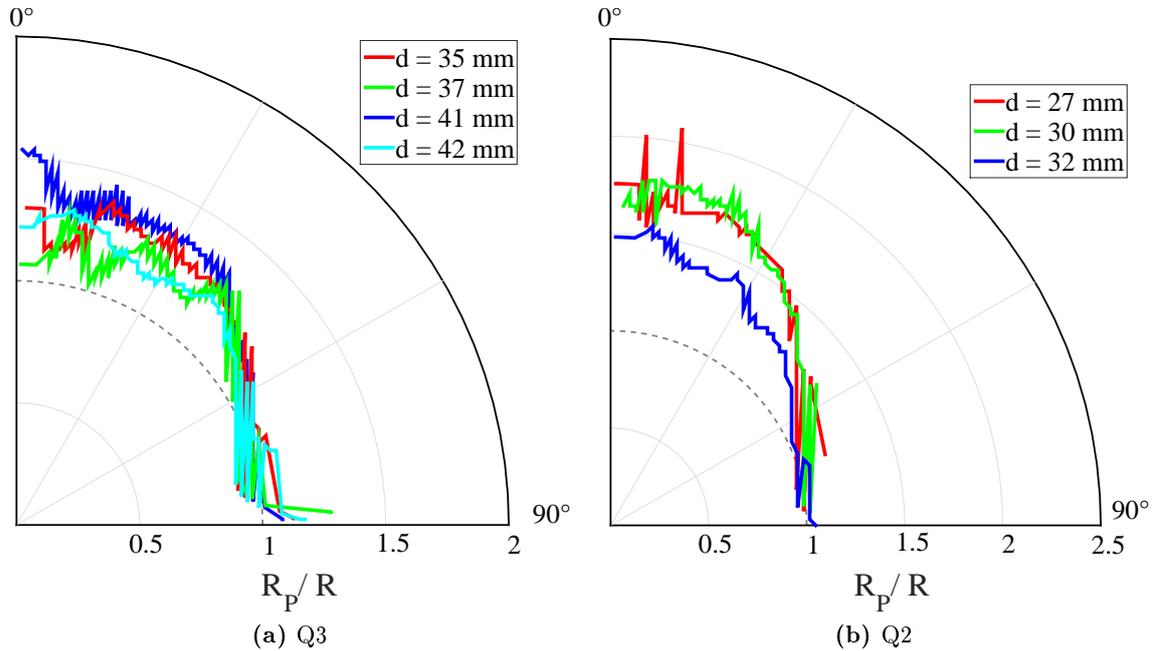


Abbildung 3.45: Domform für die angegebenen Materialien bei verschiedenen Silodurchmessern d , ermittelt aus Packungsdichteabbildungen des vorherigen Kapitels. In ihnen wird die Grenze gesucht, bei der jeweils die halbe Dichte der stehenden Zone unterschritten wird. Die Packungsdichtebilder wurden je aus der Mittelung von 30 Tomogrammen gewonnen. Dargestellt ist der Abstand der Partikel zur Siloöffnungsmittelpunkt R_P normiert auf den Siloradius R . Für $R_P/R = 1$ entspricht der Domradius dem Öffnungsradius des Silos.

können. Auf dem Rand stehende Stäbchen kommen in einigen Experimenten vor. In einigen Fällen stellen sich zwei Partikel übereinander. Dabei entstehen sehr hohe Dome. Beispiele dafür werden in Abbildung 3.46 gezeigt. Der Übergangsbereich zwischen Freiraum und granularem Material ist relativ scharf. Hier ist der Fehler in der Bestimmung der Domgröße daher klein.

Für Schokoladenlinsen ist die Domform in Abbildung 3.47 links dargestellt. Der Dom beginnt am Rand bei relativen Radien um 0,8. Die Teilchen ragen also im Mittel über den Öffnungsradius hinaus. Für kleinere Winkel verläuft der Dom bei kleinerem normierten Radius. Der Dom ist sehr flach. Der Zacken zwischen 20° und 30° entsteht durch die Bestimmungsmethode. Würde ein höherer Packungsdichtewert als Grenze zwischen Dom und Freiraum gewählt werden, wäre die Kurve glatter, wie aus dem Packungsdichtebild ersichtlich ist. Die statistischen Schwankungen sind groß.

Für Erbsen entspricht die untersuchte Domform etwa einer Halbkugel. Die Grenze verläuft nahe $R_P = R$. Die Erbsen können auf Grund ihrer annähernd runden Form nur gering aus der ersten Lage in den Hohlraum hinein stehen. Eine gemessene Domkonfiguration ist von zwei Seiten in Abbildung 3.48 dargestellt. Verschiedene Erbsen werden durch verschiedenfarbige Kugeln repräsentiert. Der Boden des Silos ist in diesem Bild als Ausschnitt in schwarz gezeigt. Es sind Löcher im Dom zu erkennen. Diese entstehen durch den Algorithmus zum Auffinden der ersten Lage. Die Teilchen werden dabei vergrößert und dann der Dom gesucht. So werden nur wenige Partikel in hinteren Lagen erfasst. Es ist zu erkennen, dass die Teilchen keine perfekte Kugelschale bilden. Einige Kugeln sind weiter innen und andere weiter außen

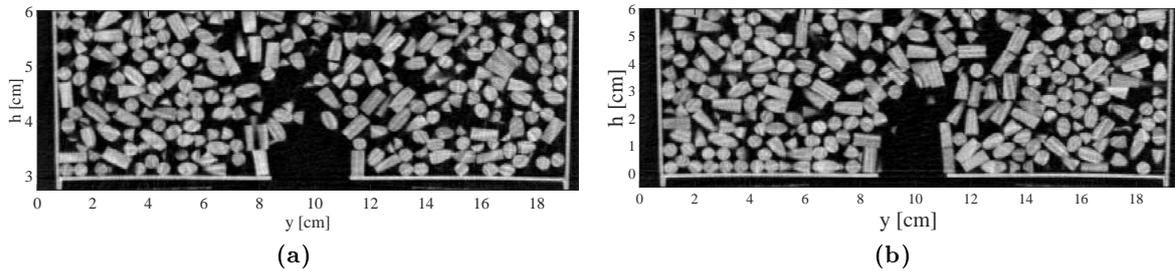


Abbildung 3.46: 2 mögliche Konfigurationen an der Öffnung des Silos für Dübel Q2. Kurze Dübel können sich am Öffnungsrand aufstellen.

anzutreffen. Damit ergibt sich eine erste Lage, die etwas breiter als ein Partikeldurchmesser ist. Durch das geringe Herausstehen aus der ersten Schicht, ergibt sich ein sehr schmaler Übergang zwischen Freiraum und Granulat. Damit ist der Fehler in der Detektion der Domgröße gering. Schwankungen um einen Mittelwert sind jedoch möglich.

Die Domform der Teilchen variiert mit der Teilchenform und entspricht nicht bei allen Materialien einer Halbkugel. Die Verhältnisse der Domradien für kleine Winkel und nahe des Silobodens sind in Abbildung 3.49 aufgetragen. Für die runden Partikel (Erbsen) und die Dübelsorte Q5 werden Dom-Aspektverhältnisse nahe 1 erreicht. Bei der zweiten Sorte aber nur, wenn alle Öffnungsgrößen mit einbezogen werden. Problematisch bei vergleichenden Aussagen ist hier, dass die verschiedenen Materialien unterschiedlich eckig sind. Erbsen und Linsen sind Ellipsoide, wohingegen die Dübel Zylinder sind. Vernachlässigt man diese Unterschiede, sind die folgenden Trends ersichtlich. Partikel mit Aspektverhältnis 1 bilden einen Dom, dessen halbe Spannweite der Höhe des Doms entspricht. Teilchen mit Aspektverhältnissen kleiner als 1 bilden einen Dom der Form einer abgeplatteten Halbkugel. Liegt das Aspektverhältnis der Partikel über 1, ist ein in die Höhe gestreckter Dom zu finden. Dabei zeigt sich für die drei Dübelsorten Q2, Q3 und Q5 der Trend, dass mit wachsendem Teilchenaspektverhältnis das Aspektverhältnis des Doms gegen 1 fällt. Der Dom also flacher wird.

Um diese Aussagen absichern zu können, wären weitere Experimente mit anderen Partikelaspektverhältnissen unter 1 nötig. Des Weiteren sollte die Domform für die Dübel Q5 bei anderen Lochgrößen überprüft werden. Ist diese für gut ausfließende Lawinen unabhängig von der Öffnung? Außerdem passen die Dübel Q8 nicht in den Trend der anderen Dübel. Zwischenpunkte sollten genommen werden. Hier kann spekuliert werden ob es einen zweiten Effekt für Granulate mit langen Partikeln gibt. Die Teilchen können sehr gut Verkanten und damit hohe Dome bilden. Dies ist vor allem bei kleinen Lawinen zwischen zwei Verstopfungszuständen gegeben. Hier würden nur einige Teilchen vor allem oben im Dom, die nicht zu seiner Stabilität beitragen, herausgelöst werden. Dadurch kann der Dom nach mehreren solcher Lawinen sehr hoch werden.

Die hier vorgestellte Methode ist vor allem für Partikel mit Aspektverhältnissen um 1 empfehlenswert, da die Domkonfigurationen bei verschiedenen Verstopfungen ähnlich sind. Für größere Abweichungen von der Kugelform werden die statistischen Fehler groß.

In zweidimensionalen Experimenten wurden von Garcimartín et al. [97] ebenfalls Dom-Aspektverhältnisse von 1 für den verstopfenden Bogen gefunden. Diese traten bei Bögen mit großen Spannweiten, verglichen mit der Siloöffnung, auf. Das sei ein Hinweis auf eine gleichmäßige Belastung von allen Seiten auf den Bogen. Diese Erklärung kann auf den dreidimensionalen

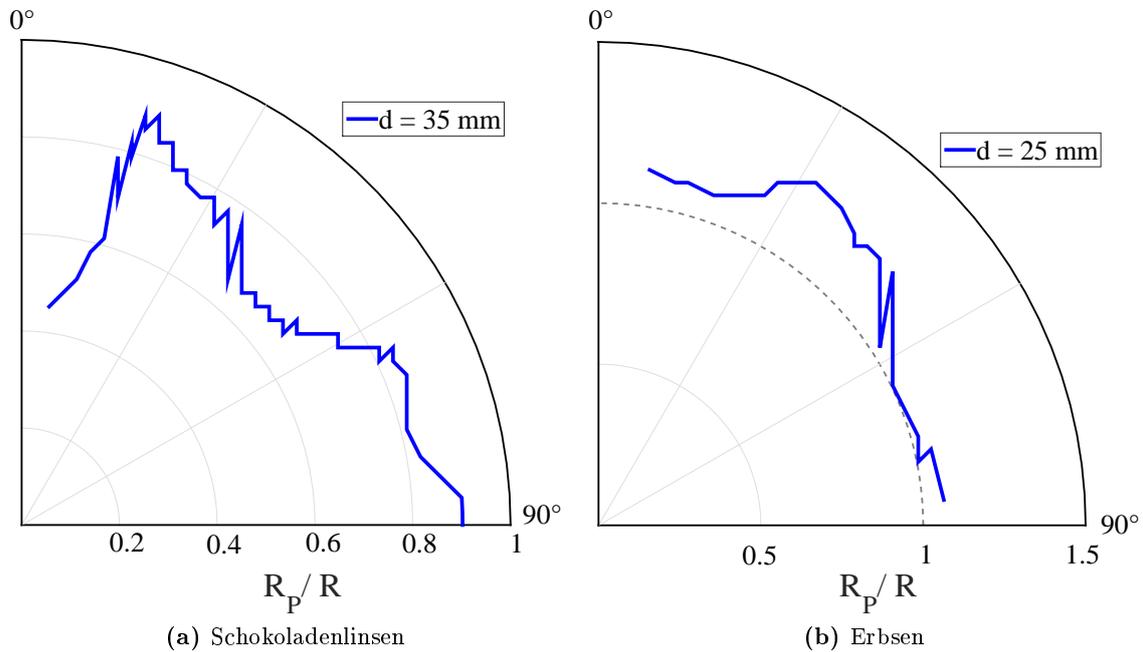


Abbildung 3.47: Domform für die angegebenen Materialien bei verschiedenen Silodurchmessern d , ermittelt aus Packungsdichteabbildungen des vorherigen Kapitels. In ihnen wird die Grenze gesucht, bei der jeweils die halbe Dichte der stehenden Zone unterschritten wird. Die Packungsdichtebilder wurden je aus der Mittelung von 30 Tomogrammen gewonnen. Dargestellt ist der Abstand der Partikel zur Siloöffnungsmittelpunkt R_P normiert auf den Siloradius R . Für $R_P/R = 1$ entspricht der Domradius dem Öffnungsradius des Silos.

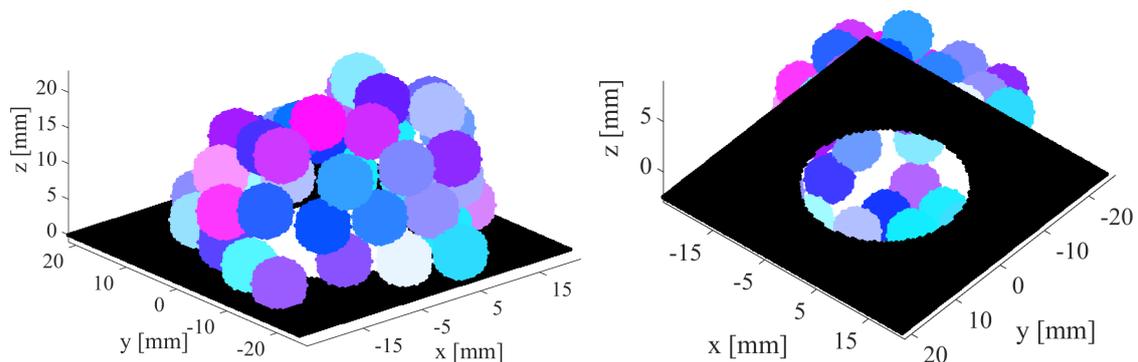


Abbildung 3.48: Dom eines Experiments mit Erbsen, links: von einer Seite, entnommen aus [119] - Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry, rechts: von unten durch die Öffnung des Silos. Die Erbsen sind als unterschiedlich farbige Kugeln dargestellt. Ein Ausschnitt des Bodens des Silos ist schwarz dargestellt.

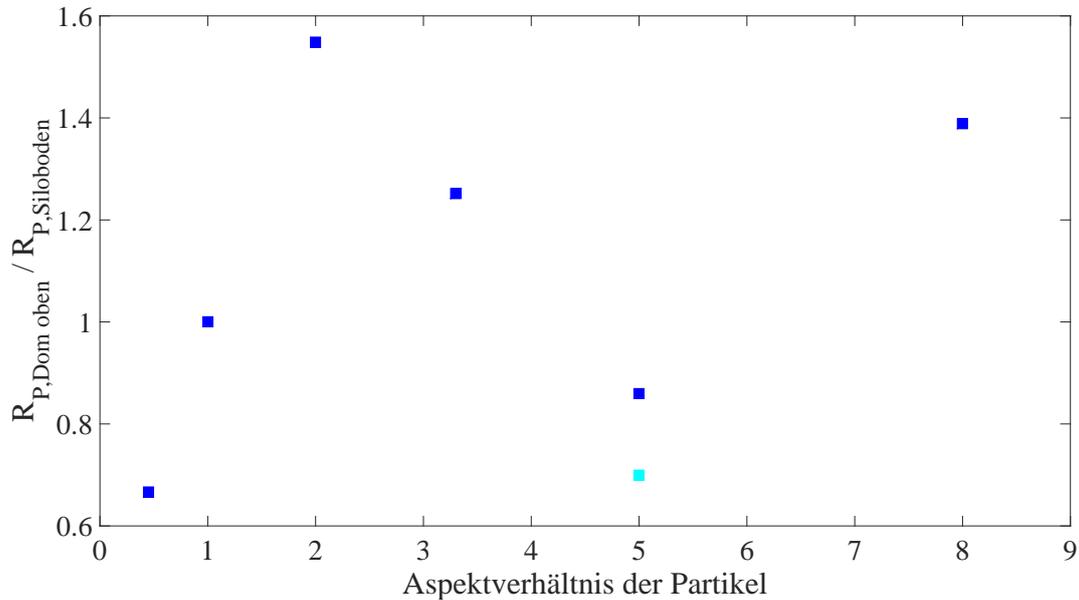


Abbildung 3.49: Domform bzw. Verhältnis der Domgröße am Siloboden zu der bei kleinen Winkeln in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses Q der Partikel (Dübel Q8, Q5, Q3, Q2 und Erbsen). Der hellblaue Datenpunkt entspricht dem Verhältnis der Dübel Q5, wenn nur die Öffnungsgrößen $d = 37$ mm, $d = 41$ mm verwendet werden.

Dom übertragen werden. Die einzige größere Abweichung zeigt sich für die Dübel Q2. Hier ist der Dom eher höher als breit. Dies könnte durch eine große Eckigkeit der Teilchen verursacht sein.

Anzahl der Partikel im Dom

Die Anzahl der Partikel im Dom kann für verschiedene Materialien in Abhängigkeit der Siloöffnung bestimmt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die erste Lage von Teilchen an den Grenzen der Öffnung endet und der Dom einer Halbkugel entspricht. Diese Annahmen stimmen weitestgehend mit den Ergebnissen des vorherigen Abschnitts über die Domform überein. Eine Verdeutlichung der Geometrie und der Beschriftung ist dazu in Abbildung 3.50 gegeben. Damit kann die Abhängigkeit vom Siloradius wie folgt beschrieben werden.

Die Fläche A_{HK} , der vom Dom aufgespannten Halbkugel, beträgt in Abhängigkeit des Siloöffnungsradius R und in Abhängigkeit des Partikelradius r

$$A_{HK} = 2\pi(R + r)^2. \quad (3.1)$$

Um die Anzahl der Partikel, die in diese Fläche passen, abzuschätzen, wird die Querschnittsfläche der Partikel A_K benötigt:

$$A_K = \pi r^2. \quad (3.2)$$

Die Anzahl N ergibt sich aus dem Quotienten der beiden Flächen und einem Flächenfüllfaktor γ zu

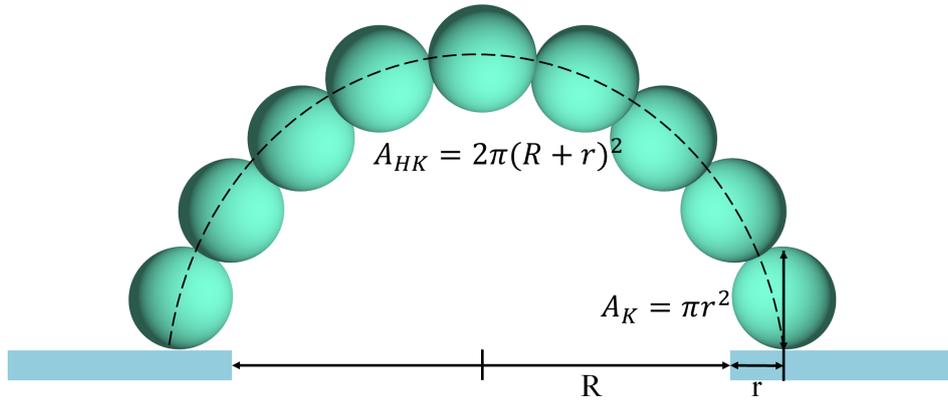


Abbildung 3.50: Bezeichnungen im Dom und Erläuterung des quadratischen Fits der Anzahl der Partikel in der ersten Lage

$$\begin{aligned} N &= \gamma \cdot \frac{A_{HK}}{A_K} \\ &= 2\gamma \left(\frac{R}{r} + 1 \right)^2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Werden statt runder Partikel längliche verwendet, wird der Radius der Teilchen durch den Äquivalenzradius r_{eq} ersetzt. Dieser Radius eines anisometrischen Teilchens entspricht dem Radius einer Kugel mit Volumen des länglichen oder flachen Teilchens, $r_{\text{eq}} = \sqrt[3]{3V_{\text{Teilchen}}/4\pi}$. So geht das Volumen bzw. eine mittlere Ausdehnung der Partikel mit in die Betrachtung ein.

$$N = 2\gamma \left(\frac{R}{r_{\text{eq}}} + 1 \right)^2 \quad (3.4)$$

Die experimentell erstellten Daten der kugelförmigen und länglichen Teilchen sind in den Abbildungen 3.51 und 3.52 dargestellt. Die Ergebnisse ergaben sich durch verschiedene Experimente. Es wurden Fotos von unten durch die Siloöffnung erstellt, um die Partikel des Doms zu zählen. Außerdem sind zum einen Tomogrammdaten gezeigt, bei denen im Dreidimensionalen die jeweils ersten Partikel der Richtungen gesucht wurden. Zum anderen wurden die Tomogrammdaten der Erbsen so auf eine Ebene projiziert, dass sie auch durch die Siloöffnung gezählt werden konnten. Dabei wird durch die Siloöffnung vertikal nach oben geschaut und der erste Eintrag mit einem Teilchen für jeden Pixel des Lochs gespeichert. In diesem Bild können dann die Erbsen wie auf einem Foto ausgezählt werden. Im Weiteren ist für jedes Material eine Grenze eingezeichnet, bei der kein Verstopfen des Silos mehr erfolgte. Diese kritische Öffnung basiert auf einer Beschreibung des Verstopfungsverhaltens mittels Potenzgesetz [4]. Neuere Untersuchungen von Thomas und Durian [105, 106] zeigen, dass das Verhalten eher durch ein exponentielles Gesetz beschrieben werden sollte. Wie in [105] erklärt, wäre es jedoch sinnvoll, einen kritischen Öffnungsradius aus praktischen Gründen einzuführen. Hier wird der Öffnungsradius als kritischer verwendet, bei dem bei nach dem fünften Füllen und Ausfließen des Silos keine Verstopfung erreicht werden konnte.

Alle Daten wurden für die kugelförmigen Teilchen und die Fotodaten für die länglichen Partikel durch Formel 3.4 gefittet.

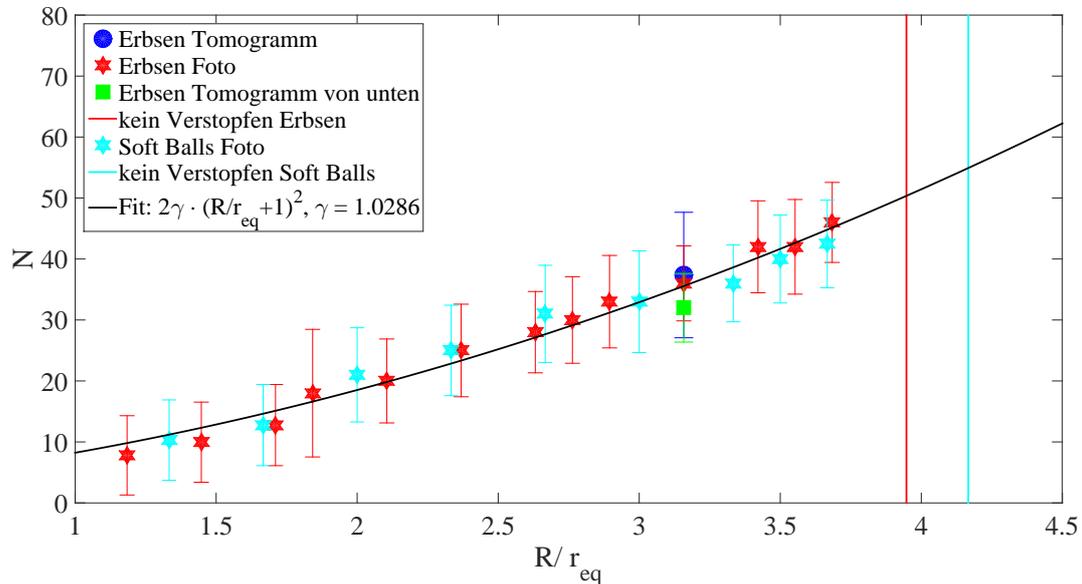
Für Erbsen und Soft-Balls ist zu erkennen, dass beide Teilchensorten dem gleichen Trend folgen. Auch die beiden aus Tomogrammen gewonnenen Datenpunkte zeigen keine Abweichungen vom mittleren Verlauf. Die Ergebnisse der beiden Methoden unterscheiden sich leicht voneinander. Das manuelle Auszählen der Projektion ergibt weniger Teilchen. Beim automatischen Suchen in drei Dimensionen werden mehr Teilchen in hinteren Lagen gefunden. Diese waren in der Projektion nicht oder nur mit einzelnen Pixeln zu erkennen.

Alle Daten können für diese beiden Teilchensorten sehr gut mit Formel 3.4 angenähert werden. Im Rahmen ihrer Fehler liegen sie auf der resultierenden Kurve. Der Flächenfüllfaktor ergibt sich aus dem Fit und ist damit für runde Teilchen $\gamma \approx 1$. Dieser liegt etwas höher als die maximale Packungsdichte in einer Ebene von 0,907. Hier verteilen sich die Kugeln jedoch nicht nur in einer Ebene, sondern können auch ein Stück dagegen versetzt sein, wie in Abbildung 3.48 zu erkennen ist. Dies wird auch in zweidimensionalen Experimenten mit Kugeln [97] und Scheiben [99] gefunden. Diese Partikel werden in einem nicht überall konvexen Bogen durch Reibung gehalten. Die Annahme, dass die Kugeln ihren Mittelpunkt nicht direkt über der Kante der Öffnung haben, sondern dieser ein Stück nach innen versetzt ist, wird vom Fit und auch der Abbildung 3.48 bestätigt. Dies trifft nicht auf alle Partikel zu, ist jedoch im Mittel richtig.

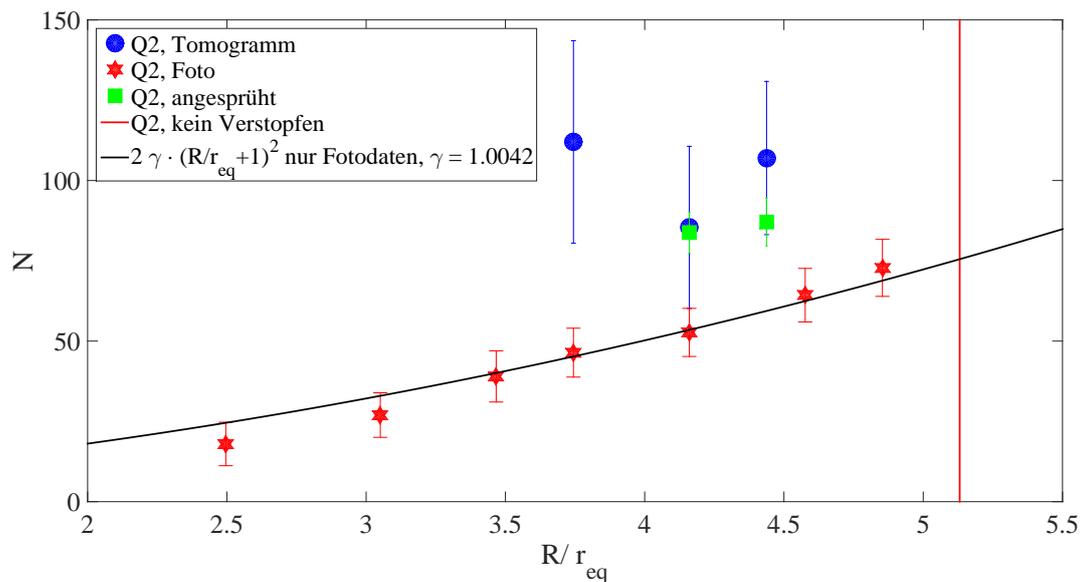
Für die Dübel Q2 ist die Anzahl der zum Dom gehörenden Partikel ebenfalls in Abbildung 3.51 dargestellt. Hier ist zu sehen, dass die Tomogrammdaten jeweils eine wesentlich höhere Anzahl an Domteilchen aufweisen als auf den Fotos ausgezählt werden können. Beide Methoden können fehlerhaft sein. Bei Tomogrammen werden auch Teilchen aus einer hinteren Schicht gefunden, so dass die Anzahl höher liegt, als die der reinen ersten Schicht ist. Bei Fotos durch die Siloöffnung können Teilchen, die nahe der Öffnung weiter nach außen zur Silowand liegen, nicht immer erkannt werden. Hier können daher weniger Teilchen als eigentlich in der ersten Lage vorhanden sind, gefunden werden. Dieser Fehler wird bei den Dübeln Q2 häufiger auftreten als bei den anderen Sorten, da der Dom eher hoch als halbkugelförmig ist, wie im vorherigen Kapitel gezeigt. Die Stäbchen stellen sich am Rand übereinander, vergleiche Abbildung 3.46, und können dann auf einem Foto durch die Siloöffnung von unten teils nicht mehr gesehen werden.

Für die Foto-Methode, bei der mehr Daten vorliegen, da diese unaufwändiger und günstiger ist, weil sie jederzeit zügig mit gut verfügbaren Geräten durchführbar ist, wurde Formel 3.4 angefitet. Die Daten sind sehr gut mit dem Verlauf der Kurve beschreibbar. Die Annahme der Beschreibung mit einem Äquivalenzradius ist für Teilchen, die vergleichsweise wenig von einer Kugel abweichen, gegeben. Der Flächenfüllfaktor ist erneut etwa 1. Damit ist er so groß wie für Kugeln. Hier können die Teilchen ebenfalls leicht gegeneinander versetzt sein, so dass sie keine glatte Ebene bilden und damit eine größere Anzahl pro Fläche erreichen. Außerdem ergibt sich für längliche Partikel die Möglichkeit, dass viele von ihnen mit der kleineren Seite in der Domfläche liegen. Damit können sie eine größere Flächenbelegung erreichen, als Kugeln gleichen Volumens.

Außerdem wurde hier eine dritte Methode getestet. Dabei wurde von unten in die Siloöffnung Farbe gesprüht, so dass die Domteilchen markiert werden. Nach dem Ausfließen werden die bunten Teilchen gezählt. Hier werden Teilchen vernachlässigt, die nur eine kleine gefärbte Stelle aufweisen, da diese sicher in den hinteren Lagen waren. Dieses Verfahren weist sonst im Mittel wesentlich mehr Dompartikel auf, bei $d = 30$ mm: 171, bei $d = 32$ mm 177, als vorhanden sind, da die Farbe auch weit hinten liegende Dübel erreichen konnte. Es ist nicht sichergestellt, ob sich die Farbe zwischen Teilchen noch weiter nach hinten zieht. Die Ergebnisse

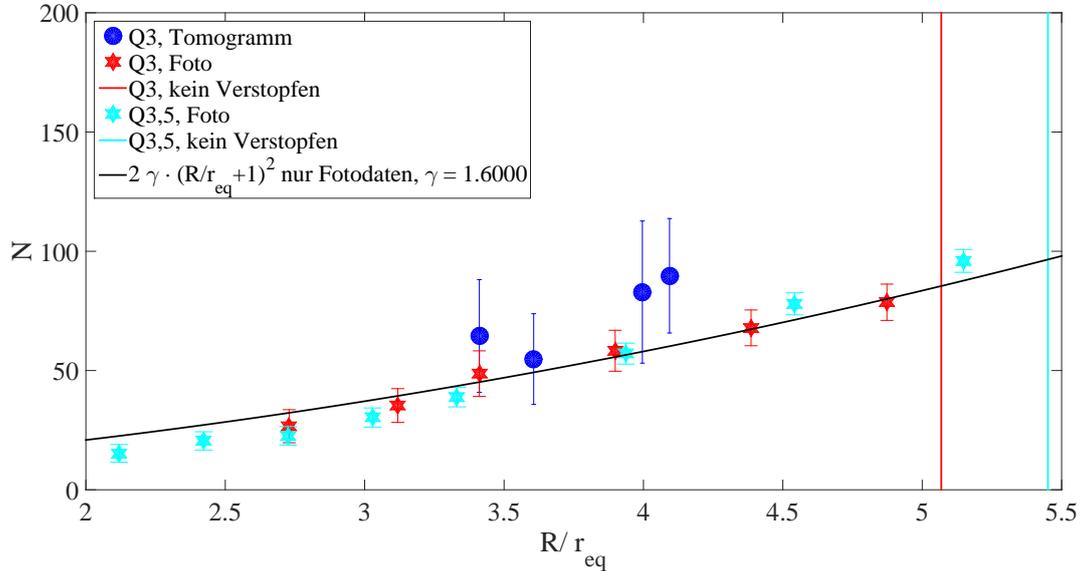


(a) Kugelförmige Teilchen

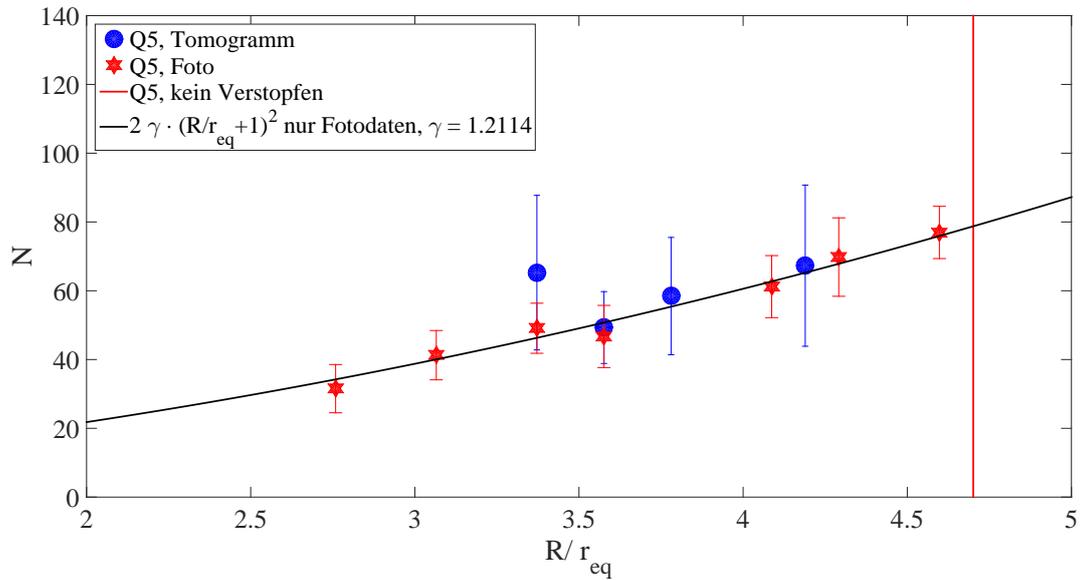


(b) Dübel Q2

Abbildung 3.51: Anzahl N dombildender Partikel in Abhängigkeit des relativen Siloöffnungsradius R/r_{eq} (R - Öffnungsradius Silo, für kugelförmige Teilchen gilt für den Äquivalenzradius: $r_{eq} = r_{\text{Teilchen}}$, sonst: $r_{eq} = \sqrt[3]{3V_{\text{Teilchen}}/4\pi}$) für kugelförmige Partikel, Erbsen und Soft-Ball-Munition, und Dübel Q2, aufgenommen mit verschiedenen Techniken: Computertomografie, Foto von unten in die Siloöffnung, Projektion der Teilchen des Tomogramms, so dass sie von unten durch die Öffnung gezählt werden können. Dübel Q2 von unten mit Farbe angesprüht, so dass nach einer Lawine die am Dom beteiligten Teilchen gezählt werden. Jeder Datenpunkt stellt die Mittelung über mindestens 30 Messungen dar. Bei der Ansprühmethode werden je 10 Messungen verwendet.



(a) Dübel Q3, Glasstäbchen Q3,5



(b) Dübel Q5

Abbildung 3.52: Anzahl N dombildender Partikel in Abhängigkeit des relativen Siloöffnungsradius R/r_{eq} (R - Öffnungsradius Silo, $r_{eq} = \sqrt[3]{3V_{\text{Teilchen}}/4\pi}$ - Äquivalenzradius) für längliche Partikel, Dübel Q3, Q5 und Glasstäbchen Q3,5, aufgenommen mit verschiedenen Techniken: Computertomografie und Foto von unten in die Siloöffnung. Jeder Datenpunkt stellt die Mittelung über mindestens 30 Messungen dar. Unteres Bild entnommen aus [119] - Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry.

der stark gefärbten Teilchen liegen in Trend der Tomogrammdaten. Durch die Subjektivität der Ergebnisse, welches Stäbchen stark und welches wenig gefärbt ist, wurde das Verfahren nicht weiter verwendet.

Die Abhängigkeit der Partikelanzahl des Doms für die Teilchen mit längerem Aspektverhältnis ist in Abbildung 3.52 angegeben. Die Daten der Dübel Q3 ($Q = 3,3$) und die der Glasstäbchen ähnlichen Aspektverhältnisses $Q = 3,5$ werden in der oberen Darstellung gezeigt. Auch hier weisen die verschiedenen Methoden unterschiedliche Ergebnisse aus den oben beschriebenen Gründen auf. Die Fotodaten beider Materialien folgen einem Trend, der erneut sehr gut mit Formel 3.4 beschrieben werden kann. Der Flächenfüllfaktor ist etwas größer als für die anderen drei Materialien. Er liegt bei $\gamma \approx 1,16$. Die größere Abweichung von der dichtesten Kugelpackung in einer Ebene lässt sich erneut damit erklären, dass die Teilchen mit ihrer kurzen Ausdehnung in die sichtbare Fläche des Doms hineinzeigen. Sie nehmen damit einen geringeren Platz als Kugeln gleichen Volumens ein.

Die Dübel Q5 wurden ebenfalls untersucht. Drei der vier Tomogrammdatenpunkte stimmen gut mit den Ergebnissen der Foto-Methode überein. Dies könnte durch den vergleichsweise flachen Dom bedingt sein. Auf den Fotos sind alle Teilchen gut sichtbar, da die Domwände nicht so steil sind, wie bei den Dübeln Q2. Um die Ergebnisse besser mit den anderen Materialien vergleichen zu können, werden hier auch nur die Foto-Daten gefittet. Die Daten stimmen sehr gut mit der Kurve überein. Der Flächenfüllfaktor ergibt sich zu rund 1,2. Dieser liegt gegenüber den anderen Flächenfüllfaktoren erneut erhöht, da der Effekt, mit dem die Abweichung zur Flächenkugelpackung erklärt wird, nochmals verstärkt auftritt.

Um bestmögliche Ergebnisse zu erhalten, sollten beide Datenaufnahmemöglichkeiten kombiniert werden. Damit würden sich die Nachteile beider Methoden, zu wenig gefundene Teilchen bei der Fotomethode und zu viele Partikel aus hinteren Schichten bei der Auswertung der Computertomografiedaten, etwas ausgleichen. Für eine solche Auswertung müssten Verstopfungen bei weiteren Siloöffnungsgrößen mittels Computertomografie für die einzelnen Materialien untersucht werden.

Um den Trend der Flächenfüllfaktoren sichtbar zu machen, werden alle durch eine Kurve beschriebenen Daten und die dazugehörigen Grafen in einer Abbildung zusammengefasst. Des Weiteren wird in dieser Grafik auch je ein Messwert für Dübel Q8 und Schokoladenlinsen mit angegeben. Diese wurde aus dem automatischen Auszählen der Dompartikel aus 70 bzw. 30 Tomogrammen gewonnen. Die für diese Teilchen eingezeichneten Kurven wurden nur aus diesem einen Wert bestimmt. Hierzu wurde der Flächenfüllfaktor für die Dübel Q8 mit 1,4 und für die Linsen mit 1,1 ermittelt. Die zusammengefassten Daten werden in Abbildung 3.53 gezeigt.

Es ist zu erkennen, dass der Fitparameter und damit die Kurven für Partikel mit wachsendem Aspektverhältnis größer werden, bzw. nach oben verschoben werden. Die Annahme, dass die Teilchen häufig mit der kurzen Achse in das Loch am Auslass zeigen, wird im nächsten Kapitel näher überprüft. Die Bedingungen der Formel 3.4 sind für die Dübel Q5 und Q8 nicht völlig erfüllt. Die Teilchen ragen in die Siloöffnung hinein und liegen nicht mit ihren Grenzen am Rand auf.

Für die Dübel Q8 kann auch eine höhere Kurve in Abbildung 3.53 vorliegen, da die Dompartikelanzahl, bestimmt aus Tomogrammdaten, höher ist. Dieser Effekt tritt, wie beschrieben, bei den Dübeln Q2 und Q3 auf. Hier liegen wie bei den Dübeln Q8 hohe Dome vor. Die Tomogrammdaten liefern hier jeweils höhere mittlere Anzahlen als die Fotodaten. Für Erbsen und die Dübel Q5 ist es nicht ersichtlich.

Die Flächenfüllfaktoren sind in Abbildung 3.54 in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses Q

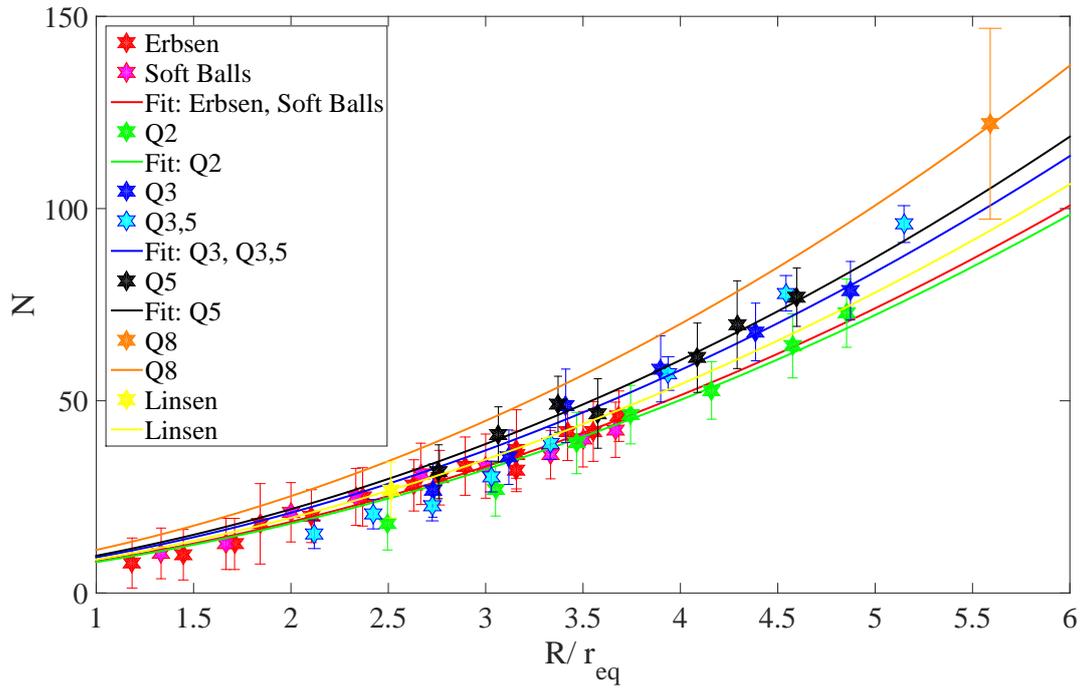


Abbildung 3.53: Vergleich der Anzahl N dombildender Partikel in Abhängigkeit des relativen Siloöffnungsradius R/r_{eq} (R - Öffnungsradius Silo, $r_{eq} = \sqrt[3]{3V_{\text{Teilchen}}/4\pi}$ - Äquivalenzradius) für alle untersuchten kugelförmigen und länglichen Partikel.

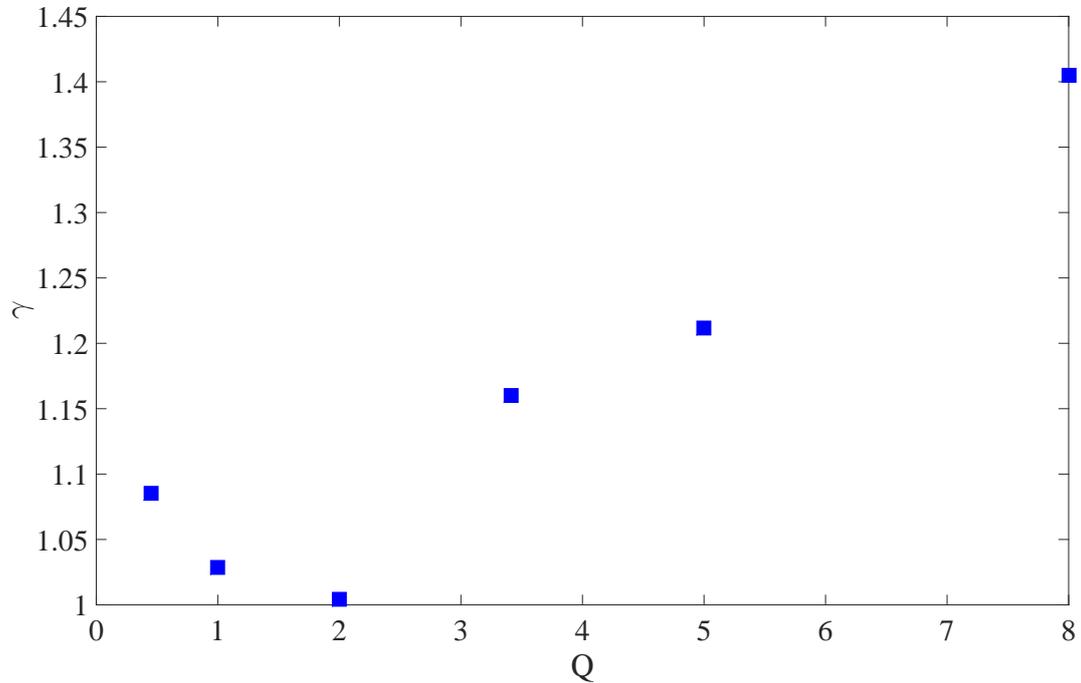


Abbildung 3.54: Zusammenfassung der Abhängigkeit des Flächenfüllfaktors γ vom Aspektverhältnis Q . Für die Dübel Q3 und die Glasstäbchen Q3,5 wurde ein mittleres Aspektverhältnis gewählt.

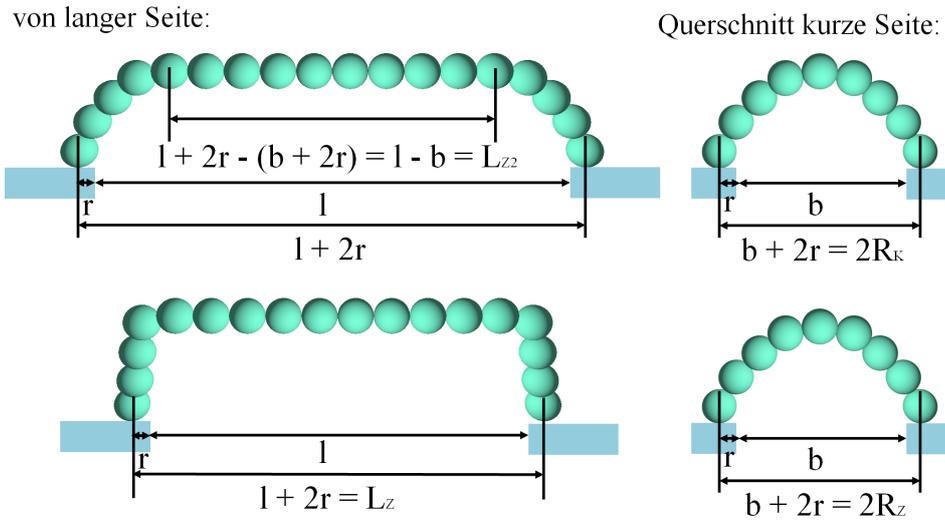


Abbildung 3.55: Bezeichnungen im Dom bei rechteckiger Siloöffnung. Obere Reihe: Modell aus Halbzylindermantel und Viertelkugeln. Untere Reihe: Modell als Halbzylinder. l ist die Länge des Schlitzes, der Teilchenradius und b die Schlitzbreite. r wird durch den Äquivalenzradius r_{eq} ersetzt.

zusammengefasst. Wie bereits diskutiert, steigt der Flächenfüllfaktor mit wachsender Abweichung von der Kugelform an. Für Zylinder, hier Dübel, ist ein fast linearer Anstieg zu erkennen. Interessant wäre zu untersuchen, wie sich Zylinder mit Aspektverhältnis 1 verhalten. Außerdem könnten andere Ellipsoide für den Vergleich mit Kugeln und Schokoladenlinsen untersucht werden.

Des Weiteren wurden einige Experimente mit einer rechteckigen Siloöffnung durchgeführt. Für diese Experimente wurden Erbsen und Dübel Q5 verwendet. Zuerst wird jedoch betrachtet, wie viele Partikel in einem Dom über solch einer Öffnung zu erwarten sind. Hierzu können zwei Betrachtungsweisen verwendet werden. Zum einen ist es möglich, dass der Dom über einer rechteckigen Öffnung die Form eines Zylinders annimmt. Zum anderen wäre denkbar, dass er durch einen Zylinder mit Viertelkugeln an den Enden beschreibbar ist. Beide Varianten sind mit den relevanten Größen in Abbildung 3.55 dargestellt.

Zuerst wird der Zusammenhang zwischen der Breite des Schlitzes b und der Anzahl der Partikel N , für einen Dom, zusammengesetzt aus einem Zylinder und zwei Viertelkugeln, hergeleitet. Dazu wird die Fläche des Doms $A_{\text{ges.}}$ betrachtet. Die Bezeichnungen aus Abbildung 3.55 werden verwendet.

$$A_{\text{ges.}} = \frac{1}{2}A_{\text{ZM}} + \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot A_{\text{K}} \quad (3.5)$$

$$A_{\text{ges.}} = \frac{1}{2}(2\pi R_{\text{Z2}}L_{\text{Z}}) + \frac{1}{2}4\pi R_{\text{K}}^2 \quad (3.6)$$

Daraus ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$A_{\text{ges.}} = \pi \left(\frac{bl}{2} + rl + br + 2r^2 \right) \quad (3.7)$$

Mit dem Ersetzen des Teilchenradius r durch den Äquivalenzradius r_{eq}^2 und Formel 3.7, der

Querschnittsfläche der Teilchen $A_T = \pi r_{\text{eq}}^2$ und dem Flächenfüllfaktor γ wird die Anzahl der Partikel N des Doms zu

$$N = \gamma \left[b \left(\frac{l}{2r_{\text{eq}}^2} + \frac{1}{r_{\text{eq}}} \right) + \frac{l}{r_{\text{eq}}} + 2 \right] \quad (3.8)$$

bestimmt. Für sehr lange Öffnungen ($l \rightarrow \infty$), also einen Schlitz im Siloboden, ergibt sich:

$$\frac{N}{l} = \gamma \left(\frac{b}{2r_{\text{eq}}^2} + \frac{1}{r_{\text{eq}}} \right). \quad (3.9)$$

Wird der Dom als Halbzylinder betrachtet, ergibt sich die folgende Herleitung des Zusammenhangs.

$$\begin{aligned} A_{\text{HZ}} &= \frac{1}{2} (2\pi R_Z L_Z + 2\pi R_Z^2) \\ A_{\text{HZ}} &= \pi \left(\frac{b^2}{4} + b \left(\frac{l}{2} + 2r_{\text{eq}} \right) + 3r_{\text{eq}}^2 + r_{\text{eq}} l \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Damit berechnet sich die Teilchenzahl zu:

$$N = \gamma \left(\frac{b^2}{4r_{\text{eq}}^2} + b \left(\frac{l}{2r_{\text{eq}}^2} + \frac{2}{r_{\text{eq}}} \right) + 3 + \frac{l}{r_{\text{eq}}} \right). \quad (3.11)$$

Für sehr lange Öffnungen ergibt sich:

$$\frac{N}{l} = \gamma \left(\frac{b}{2r_{\text{eq}}^2} + \frac{1}{r_{\text{eq}}} \right). \quad (3.12)$$

Diese Formel ist der gleiche Grenzfall wie für die vorherige Betrachtung. Für sehr lange Schlitzte entfällt der Einfluss der Ränder. Die gemessenen Dompartikelanzahlen werden zunächst über der Öffnungsbreite für die beiden untersuchten Teilchenarten in Abbildung 3.56 aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Daten ähnlich gut durch beide Funktionen angenähert werden können. Im Rahmen der Messungenauigkeiten liegen die Punkte auf den Fits. Beim Fit mit der Zylinderform ergeben sich Flächenfüllfaktoren um $\gamma = 0,86$. Es ergeben sich bei dieser Betrachtungsweise Lücken im Dom. Bei dem Fit mit dem Halbzylinder mit Viertelkugeln an den Enden sind die Flächenfüllfaktoren größer und liegen bei $\gamma_{\text{Erbsen}} = 0,93$ und $\gamma_{\text{Q5}} = 1,08$. Die Erbsen weisen damit immer noch Lücken im Dom auf, wohingegen die Dübel die Fläche mehr als auszufüllen scheinen. Dies ist begründbar durch die längliche Form der Teilchen. Wenn viele Partikel mit der kurzen Seite zum Auslass zeigen, können mehr Teilchen auf der Fläche liegen als es Kugeln mit dem gleichen Volumen könnten. Mit den vorliegenden Daten kann keine der beiden Methoden favorisiert werden.

Die kritische Öffnungsgröße entspricht erneut der Öffnung, bei der bei längerem Ausfluss keine Verstopfung auftrat. Wie oben bereits diskutiert, ist eine Verstopfung nach noch längerem Ausfluss möglich.

Im Weiteren kann die Teilchenanzahl pro Längeneinheit aufgetragen werden. Diese Daten werden der Formel 3.12, des Grenzwerts $l \rightarrow \infty$, interpoliert. Dies ist in Abbildung 3.57 dargestellt.

Die Näherung im Grenzwert beschreibt die Daten ebenfalls im Rahmen der Messunsicherheiten gut. Wobei hier kein, im Vergleich zu den Teilchenabmessungen, großer Schlitz verwendet

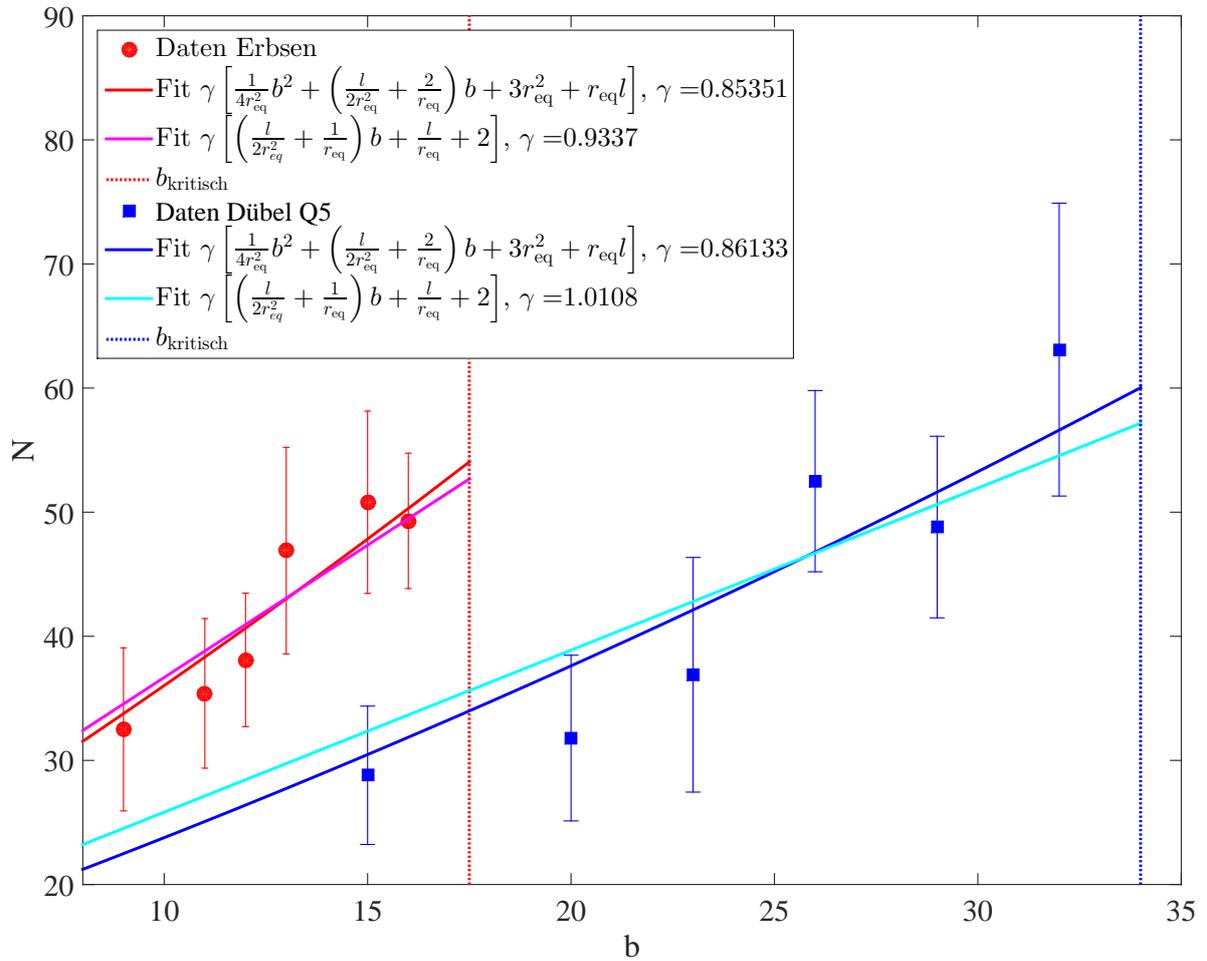


Abbildung 3.56: Anzahl der dombildenden Teilchen für eine rechteckige Siloöffnung für die Partikelarten Erbsen und Dübel Q5. Die möglichen Fits sind durch die Formeln 3.11 und 3.8 gegeben. $b_{kritisch}$ stellt die Breite der Siloöffnung dar, bei der nach längerem Ausfluss keine Verstopfung aufgetreten ist.

wurde. Die Flächenfüllfaktoren liegen bei 1,06 und 1,20. Sie sind erneut sehr ähnlich bei unterschiedlichen Partikelformen. Es ergibt sich, dass weitere Messungen mit kleineren Teilchen oder einer größeren Apparatur durchgeführt werden sollten. Dabei wäre dann dieser letzte Fit vorzuziehen.

Verglichen mit den Experimenten an der runden Siloöffnung sind die hier gefundenen Flächenfüllfaktoren für beide Materialien ähnlich bis etwas geringer. Am ehesten stimmen sie mit den Faktoren der Näherung für lange Schlitz überein. Die Dübel zeigen erneut in den Schlitz, jedoch nicht so stark wie zuvor. Sie liegen nicht vorrangig parallel zur Öffnung, wie bei dieser Geometrie eventuell vermutet werden könnte.

Die hier gezeigten Experimente zeigen nur einen ersten Trend, der unbedingt mit weiteren Granulaten überprüft werden sollte. Keiner der Fits stellt sich bei der derzeitigen Datenlage als besser als die anderen heraus. Als allgemeingültigste Beschreibung kann erstmal die Näherung für lange Schlitz verwendet werden. Dabei wäre auch zu testen, ob für eine rechteckige Öffnung ein universellerer Faktor als für runde Öffnungen gefunden werden kann. Des Weiteren sind Experimente mit Öffnungen der Form eines dreieitigen Prismas vorstellbar. Der Siloauslass

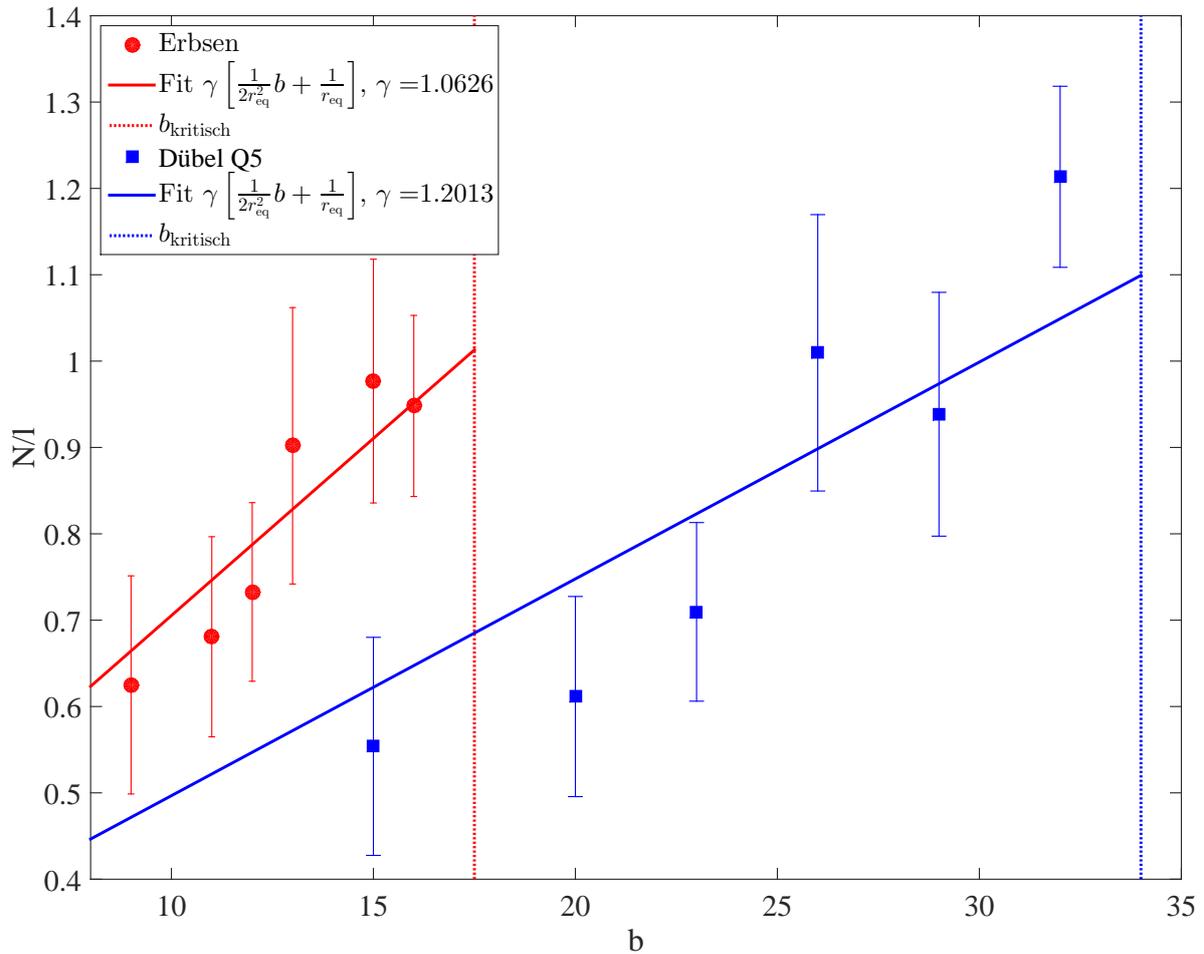


Abbildung 3.57: Anzahl der dombildenen Teilchen normiert auf die Schlitzlänge l für eine rechteckige Siloöffnung für die Partikelarten Erbsen und Dübel Q5. Der mögliche Fit ist durch die Formel 3.12 gegeben. b_{kritisch} stellt die Breite der Siloöffnung dar, bei der nach längerem Ausfluss keine Verstopfung aufgetreten ist.

würde sich dabei, ähnlich wie bei einem Trichter, oberhalb der Öffnung nach unten verjüngen. Eine mögliche Geometrie ist in der Publikation [101] zu sehen.

Ausrichtung der Partikel

Zuerst wird an einem Beispiel gezeigt, wie die erste Lage von Dübeln am runden Siloausschluss aussehen kann. Eine aufgenommene Konfiguration von Dübeln Q5 bei einem Öffnungsdurchmesser von 35 mm wird in Abbildung 3.58 gezeigt. Viele der Teilchen zeigen unter einem geringen Winkel zum Auslass. Dieses Verhalten wird im Folgenden näher untersucht.

Für Domteilchen werden die Winkelverteilungen von ϕ , siehe Abbildung 3.59, dem Winkel zwischen der langen Teilchenachse und der Verbindungslinie zwischen Siloöffnungsmitte und Teilchenschwerpunkt, von verschiedenen Granulaten je für eine Öffnungsgröße in Abbildung 3.60 dargestellt. Als Höhe der Mitte der Siloöffnung wird die Höhe der ersten Partikelschicht am Boden des Silos genommen. Es werden die Verteilungen für die Ausrichtung aller Domteilchen

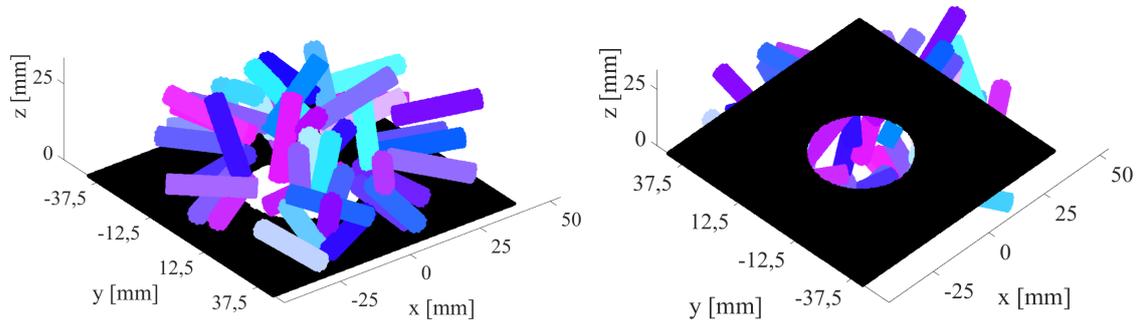


Abbildung 3.58: Eine aufgenommene Konfiguration von Dübeln Q5 bei einem Siloaussflussthroughmesser von 35 mm, links: von einer Seite, entnommen aus [119] - Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry, rechts: von unten durch die Öffnung des Silos. Die Dübel sind als unterschiedlich farbige Zylinder dargestellt. Ein Ausschnitt des Silobodens ist schwarz dargestellt.

gezeigt. Für eine Partikelgröße wird außerdem die Verteilung ausschließlich der Dompartikel aus der fließenden Zone des Silos angegeben. Bei letzterer Darstellung fehlen hauptsächlich die Partikel, die in Schichten auf dem Boden des Silos liegen. Zur Verdeutlichung ist der Winkel in Abbildung 3.59 gezeigt. Für die Schokoladenlinsen wird der Winkel zwischen ihrer kürzesten Achse und der Verbindungslinie zwischen ihrem Schwerpunkt und der Mitte der Siloöffnung gemessen.

Um die Ausrichtung besser beurteilen zu können, werden die Verteilungen $f(\phi)$ dividiert durch die Gleichverteilung, eine Sinusfunktion, für alle Domteilchen und die der fließenden Zone in Abbildung 3.61 und 3.62 dargestellt.

Es ist an den Verteilungen und besonders an den normierten zu erkennen, dass für die drei längsten Dübelsorten unabhängig von der Öffnungsgröße eine Vorzugsausrichtung vorliegt. Viele Teilchen zeigen beim Verstopfen mit ihren langen Achsen in das Loch. Dies ist begründbar durch den Fluss. Die Partikel drehen sich etwa in Flussrichtung, damit können sie besser ausfließen. Diese Ausrichtung ist vergleichbar mit der Ausrichtung in der Split-Bottom-Scherzelle. Zum Zeitpunkt des Verstopfens befinden sich so viele Teilchen am Loch, dass sie nicht mehr nebeneinander ausfließen könnten.

Eine ähnliche Ausrichtung zeigen die Dübel Q5 und Q3, wenn nur die Teilchen des fließenden Bereichs des Doms untersucht werden. Hier fehlen hauptsächlich die Partikel, die in Schichten auf dem Boden des Silos liegen. Die Dübel Q8 nehmen hier häufiger etwas größere Winkel zur Verbindungslinie ein, wie in Abbildung 3.62 zu sehen ist. Es gibt hierfür zwei Erklärungsansätze. Einerseits könnte die Domkonfiguration nach dem Verstopfen gestaucht werden. Dabei verhaken die Teilchen mit ihren unteren in den Dom zeigenden Enden so, dass sich die oberen Enden der Partikel noch weiter nach unten bewegen können. Damit liegen sie dann recht flach. Eine zweite, wahrscheinlichere Erklärung ist, dass sich eine Verstopfung bildet, weil sich viele Teilchen quer oder teilweise quer zum Fluss befinden und damit den weiteren Ausfluss behindern.

Für die kleinsten Dübel Q2 gibt es im Bereich 0° bis 40° eine erhöhte Menge an Teilchen. Aus der normierten Verteilung geht hervor, dass auch diese Partikel sich am Fluss ausrichten, jedoch nicht so deutlich, wie die größeren. Die Teilchen richten sich nicht so gut aus wie größere, da ihre Ausdehnungen in die Raumrichtungen nicht sehr stark voneinander abweichen. Dieses Phänomen konnte auch bereits unter Scherung [58] und der Ausrichtung in anderen

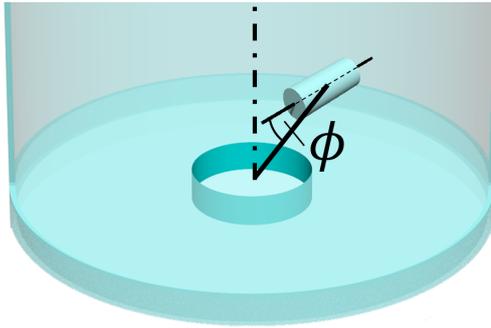


Abbildung 3.59: Die betrachtete Ausrichtung der Domteilchen: Es wird ϕ , der Winkel zwischen der Teilchenlängsachse und der Achse Teilchenmitte - Lochmitte, verwendet. Entnommen aus [119] - Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry.

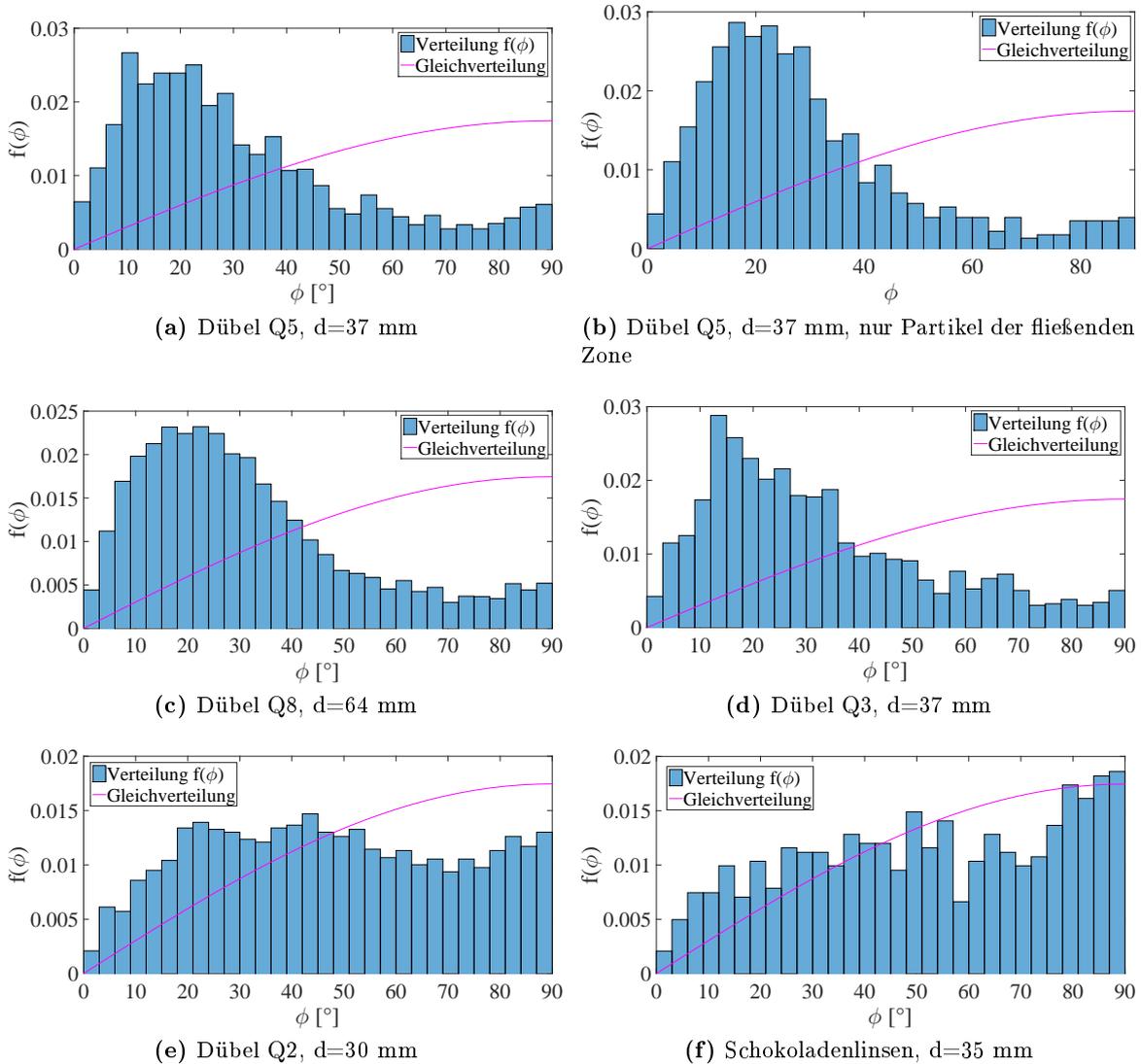


Abbildung 3.60: Verteilung des Winkels zwischen Teilchenausrichtung und Achse zwischen Stäbchenmittelpunkt und Ausflussmitte für vier Dübelgrößen und Schokoladenlinsen bei jeweils angegebenem Öffnungsdurchmesser d. Abbildungen (a), (c-e) entnommen aus [119] - Veröffentlicht von The Royal Society of Chemistry.

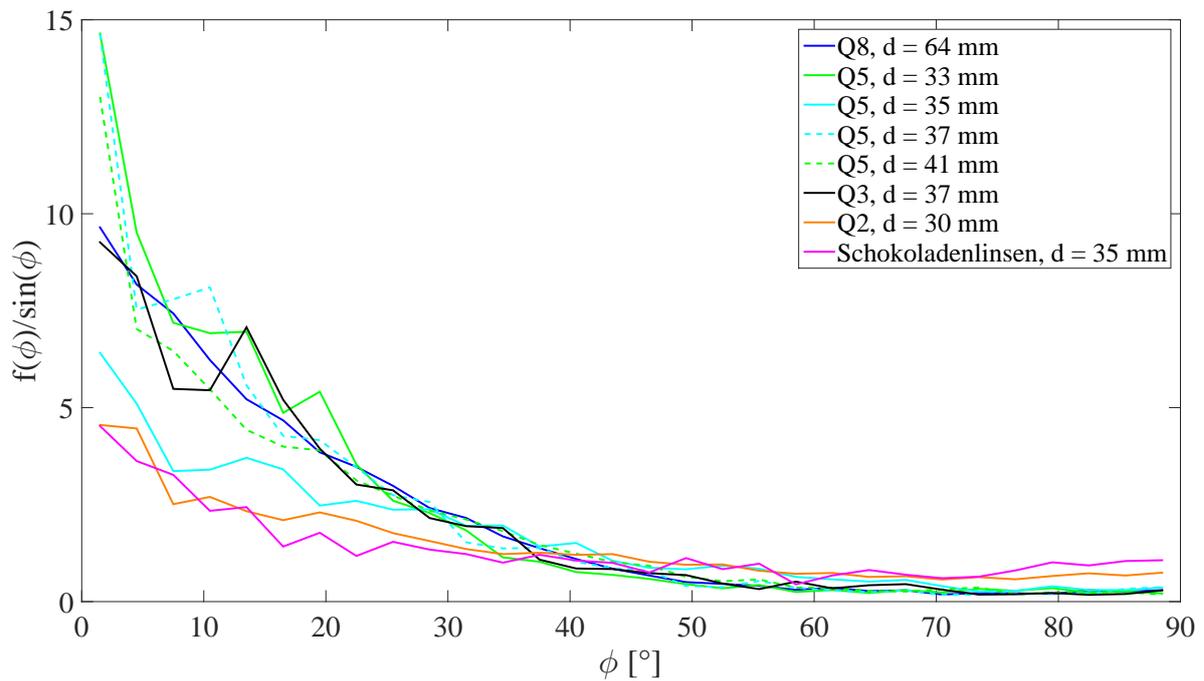


Abbildung 3.61: Verteilung $f(\phi)$ des Winkels zwischen der Verbindungslinie aus Teilchenmittelpunkt und Siloöffnungsmitte normiert auf die Gleichverteilung $\sin(\phi)$ für verschiedene Granulate bei den jeweils angegebenen Siloöffnungsdurchmessern. Es werden alle Dompartikel für die Erstellung der Verteilungen genutzt.

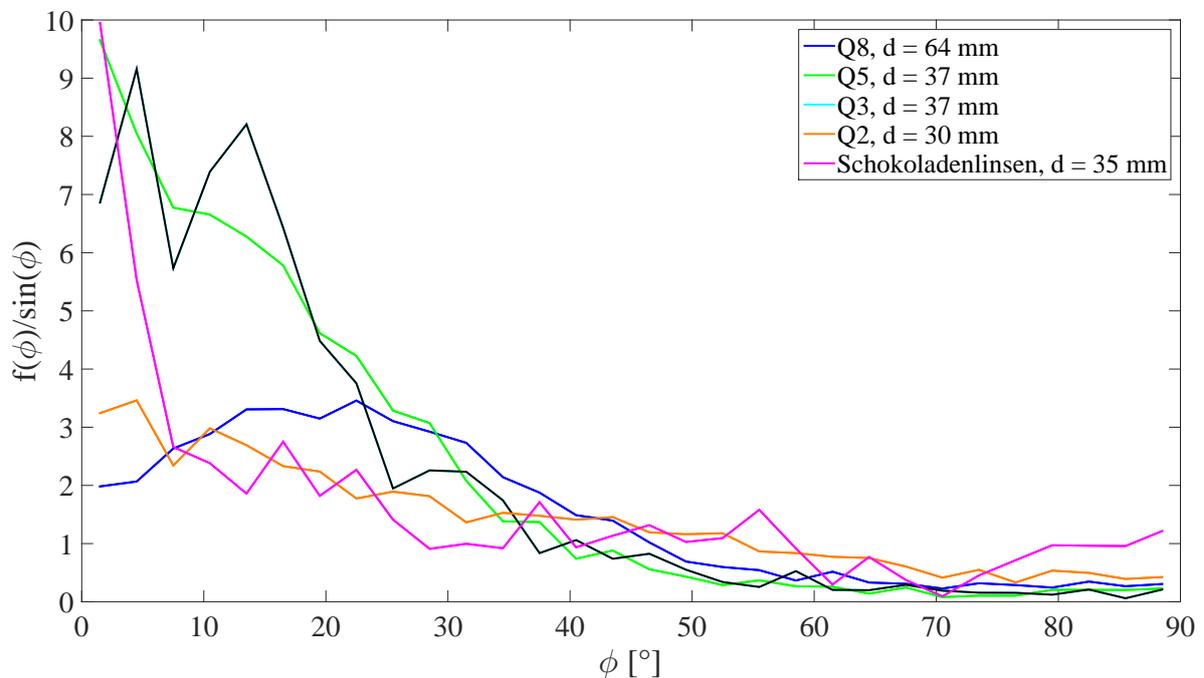


Abbildung 3.62: Verteilung $f(\phi)$ des Winkels zwischen der Verbindungslinie aus Teilchenmittelpunkt und Siloöffnungsmitte normiert auf die Gleichverteilung $\sin(\phi)$ für verschiedene Granulate bei den jeweils angegebenen Siloöffnungsdurchmessern. Es werden nur die Dompartikel, die in der fließenden Zone liegen, für die Erstellung der Verteilungen genutzt.

Silobereichen beobachtet werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich nur wenige Stäbchen an den Rändern der Siloöffnung mit senkrechter Richtung aufstellen, vergleiche Abbildung 3.47. Dies kann also nicht der Haupteffekt für den hohen Dom sein.

Für die Linsen liegt kaum eine Abweichung von der Gleichverteilung vor. Dies könnte mit ihrer Größe im Vergleich zur Auslass- bzw. Silogröße zusammenhängen. Diese Teilchen haben sich auch in den anderen Regionen, wie bereits diskutiert, nicht sehr gut im Silo ausgerichtet.

Die normierten Verteilungen weisen vor allem bei kleinen Winkeln große Schwankungen auf, da hier zwei kleine Größen durcheinander geteilt werden. Bei großen Winkeln werden die statistischen Schwankungen weniger. Damit ist gerade der interessante Winkelbereich relativ ungenau bestimmbar.

Im Folgenden kann noch betrachtet werden welcher Anteil der Teilchen steiler als die Verbindungslinie mit der Auslassmitte liegt. Dies ist in Tabelle 3.5 angegeben. Hierbei werden nur Partikel des fließenden Gebiets betrachtet, um die flach auf dem Boden liegenden Teilchen auszuschließen. Ihre Ausrichtung nach oben und unten weicht nur gering von der Verbindungslinie ab. Die Wahl der Höhe des Auslasses würde den Anteil der steiler oder flacher als die Verbindungslinie liegenden Partikel stark beeinflussen.

Tabelle 3.5: Anteil der Domteilchen, deren lange Achse steiler als die Verbindungslinie zwischen Teilchenmitte und Siloöffnungsmitte ist. Es werden nur Teilchen des fließenden Gebiets betrachtet. Für Linsen wird der Winkel zur kürzesten Achse verwendet.

		Anteil
Dübel Q8	d = 64 mm	0,06
Dübel Q5	d = 33 mm	0,46
	d = 35 mm	0,46
	d = 37 mm	0,51
	d = 41 mm	0,62
Dübel Q3	d = 35 mm	0,39
	d = 37 mm	0,48
	d = 41 mm	0,46
	d = 42 mm	0,42
Dübel Q2	d = 27 mm	0,29
	d = 30 mm	0,27
	d = 32 mm	0,32
Linsen	d = 35 mm	0,22

Es liegen oft mehr als 50 % der Teilchen flacher als die Verbindungslinie. Es gibt dabei aber große Unterschiede für die unterschiedlichen Materialien. Die Materialien, die einen flachen Dom bilden, also Materialien bei denen das Dom-Aspektverhältnis kleiner als 1 ist, vergleiche Abbildung 3.49, liegen eher steil als flach. Dies sind zum einen die Dübel Q5, vor allem bei den beiden großen Siloöffnungen. Beispiele für Tomogrammschnitte der Dübel Q5 für einen Siloöffnungsdurchmesser von 35 mm und 41 mm werden in Abbildung 3.63 gezeigt. Für die kleinere Öffnung sind flach liegende Partikel auch im fließenden Gebiet erkennbar. Dies tritt bei fast allen Tomogrammen dieser Öffnung auf. Es zeigt sich ein sehr hoher Dom. Die Kuppel in der Abbildung gehört für diese Öffnung zu den höchsten. Die Kuppeln der anderen Tomogramme

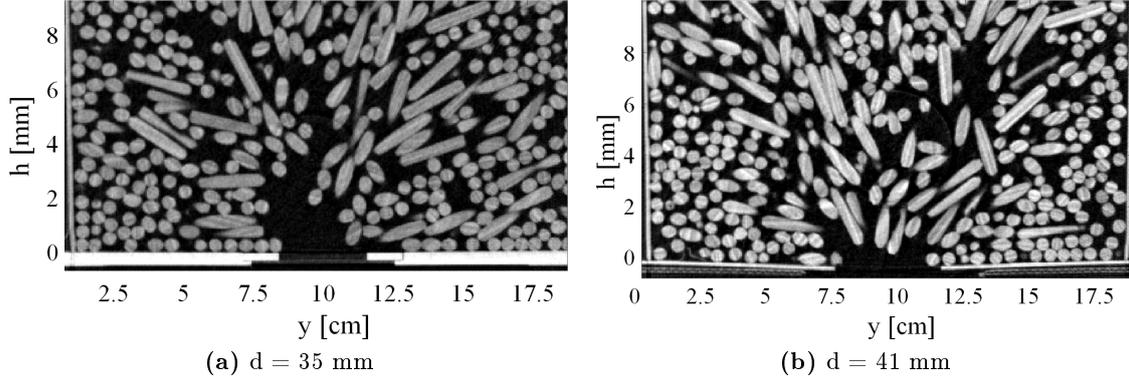


Abbildung 3.63: Tomogrammschnitte an den angegebenen Öffnungen des Silos für Dübel Q5.

sind meist flacher, aber dennoch höher als für größere Öffnungen. Stehen viele Dübel steil im fließenden Gebiet, wie bei der größeren Öffnung, bildet sich ein flacherer Dom. Sehr viele Tomogramme ähneln dem rechten Tomogrammschnitt der Abbildung 3.63 bei dieser Siloöffnung sehr. Tendenziell bildet sich bei größeren Siloöffnungen ein flacherer Dom als bei kleineren. Zum anderen zeigen die Schokoladenlinsen einen flachen Dom und eine steile Ausrichtung. Da hier die kürzeste Achse der Linsen verwendet wird und diese flacher als die Verbindungslinie liegt, steht eine lange Achse steiler als die Verbindungslinie. Die Dübel Q3 bilden den Übergang zu hohen Kuppeln am Siloausslass. Die Dübel Q2 und Q8 liegen deutlich im Mittel flacher als die Verbindungslinie. Sie zeigen sehr hohe Dome. Flacher als die Verbindungslinie liegende Teilchen könnten ursächlich für einen hohen Dom sein. Bei den Dübeln Q2 tritt ein weiterer bereits genannter Effekt auf. Die Teilchen können sich am Rand aufstellen, vergleiche Abbildung 3.46. Die beiden Effekte ergänzen sich, so dass sehr hohe Dome entstehen können.

Des Weiteren kann mit den Winkeln zwischen den Teilchenachsen und den Verbindungslinien überprüft werden, wie groß die Projektionsfläche der Partikel auf die Domfläche ist. Damit kann auch aus diesen Daten ein Flächenfüllfaktor abgeschätzt werden.

Die auf eine Ebene projizierte Fläche eines Zylinders kann wie folgt aus zwei Anteilen, einem projizierten Kreis, also einer Ellipse, und der projizierten Mantelfläche, einem Rechteck, abgeschätzt werden.

$$\begin{aligned}
 A_{\text{proj}} &\sim A_{\text{Ellipse}} + A_{\text{Rechteck}} \\
 &\sim \pi \frac{d}{2} b + dl_{\text{effektiv}} \\
 &\sim \pi \frac{d}{2} \frac{d}{2} \cdot \cos(\phi) + dl \cdot \sin(\phi) \\
 A_{\text{proj}} &\sim d \left(\frac{d\pi}{4} \cdot \cos(\phi) + l \cdot \sin(\phi) \right)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Diese projizierte Fläche wird für alle Domteilchen berechnet. Wird der Dom als Halbkugel angenommen und eine vollständige Abdeckung mit Teilchen vorausgesetzt, kann die mittlere Anzahl der Teilchen im Dom errechnet werden. Außerdem kann ein neuer Äquivalenzradius $r_{\text{eq,proj}}$ eingeführt werden. Dieser entspricht dem Radius einer Kugel, deren Querschnittsfläche gleich der projizierten Fläche der Teilchen ist. Es ergeben sich im Mittel die folgenden Äquivalenz-

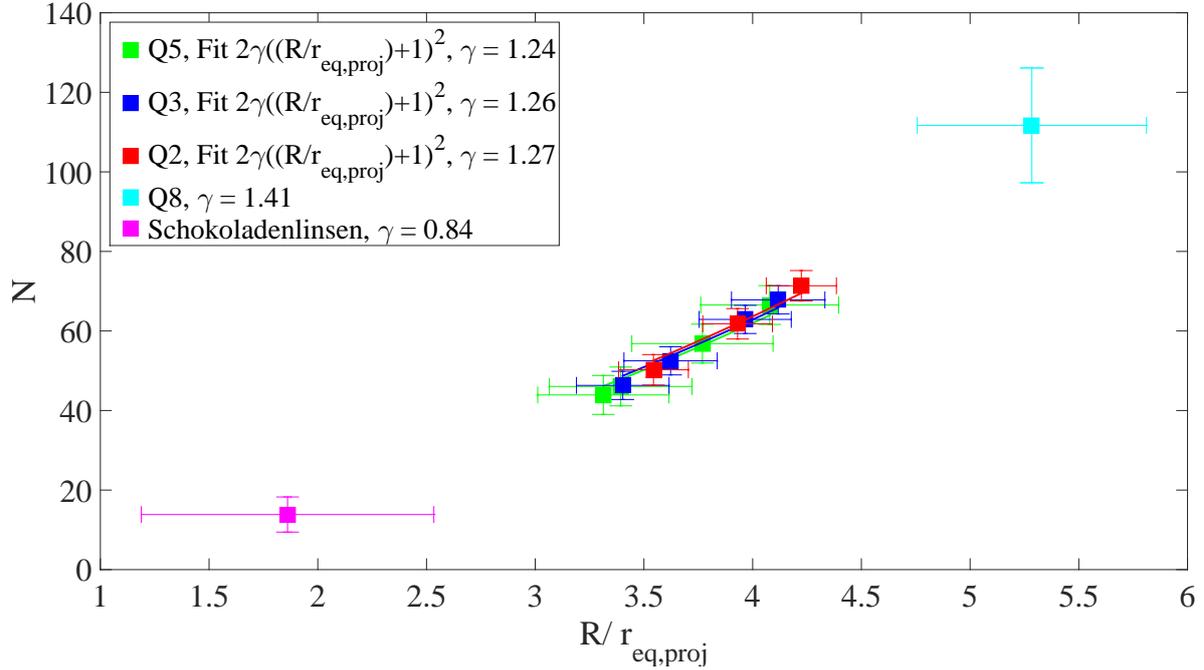


Abbildung 3.64: Anzahl N dombildender Partikel in Abhängigkeit des relativen Siloöffnungsradius $R/r_{eq,proj}$ (R - Öffnungsradius Silo, $r_{eq,proj} = \sqrt{A_{proj}/\pi}$ - neuer Äquivalenzradius mit A_{proj} - mittlere Fläche eines auf die Ebene projizierten Teilchens) für Dübel Q8, Q5, Q3, Q2 und Schokoladenlinsen. Die Teilchenanzahl N wurde als der Quotient aus der Domfläche und der mittleren Fläche der auf eine Ebene projizierten Teilchen, siehe Formel 3.13, berechnet. Als Dom wird dazu näherungsweise eine Halbkugel mit dem jeweiligen Siloöffnungsradius genutzt.

radien $r_{eq,proj,Q8} = 6,1$ mm, $r_{eq,proj,Q5} = 5,0$ mm, $r_{eq,proj,Q3} = 5,1$ mm, $r_{eq,proj,Q2} = 3,8$ mm und $r_{eq,proj,Schokoladenlinsen} = 9,4$ mm. Es zeigt sich für die Dübel, dass die eingenommene Fläche der Teilchen auf der Domoberfläche etwa der Querschnittsfläche einer Kugel mit dem Äquivalenzradius r_{eq} entspricht. Einen Äquivalenzradius für längliche Teilchen einzuführen, ist also sinnvoll. Die Abweichung bei den Schokoladenlinsen kann damit begründet werden, dass zur Berechnung des Äquivalenzradius ein Zylinder angenommen wird, der bei den stark abgerundeten Teilchen nicht vorliegt.

Die mittlere Anzahl der Partikel über der normierten Siloöffnung wird in Abbildung 3.64 aufgetragen. Die Darstellung ist vergleichbar mit den Abbildungen 3.51 bis 3.53. Die ermittelten Füllfaktoren γ können mit den aus Abbildung 3.54 verglichen werden.

Es ergeben sich für Dübel Flächenfüllfaktoren größer als 1. Dies kann erneut damit begründet werden, dass die Partikel im Mittel mit ihren kurzen Ausdehnungen zum Siloauslass zeigen. Damit nehmen sie eine geringere Fläche als Kugeln gleichen Volumens ein. Für die Dübel Q8 und Q5 ergeben sich hier sehr ähnliche Füllfaktoren wie für die ausgezählten Dübel, vergleiche Abbildung 3.54. Die Ergebnisse sind so ähnlich, weil die Daten der ersten Berechnung die hier verwendeten Tomogrammdaten sind (Dübel Q8), bzw. für die Dübel Q5, sie sich mit den Fotodaten decken. Die Flächenfüllfaktoren der Dübel Q3 und Q2 sind höher als die vorher ermittelten, da die Tomogrammdaten mehr Domteilchen als die Fotodaten liefern. Die Schokoladenlinsen weisen einen geringeren Füllfaktor auf, da sowohl bei der Berechnung des Äquivalenzradius, als auch bei der Berechnung der projizierten Fläche von einem Zylinder,

nicht von einem Ellipsoiden, ausgegangen wird. Damit konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Messung der Anzahl der Partikel im Dom und die Ermittlung der Ausrichtung der Teilchen ähnliche Ergebnisse erzeugen.

Es wurde mit den gezeigten Experimenten festgestellt, dass sich die Partikel bei einem verstopften Silo am Fluss ausrichten und in den fließenden Gebieten Reynoldsdilatanz auftritt. Je nach Siloöffnung und granularem Material treten bei Verstopfung des Silos Dome mit verschiedenen Aspektverhältnissen auf. Die Form korreliert mit der Ausrichtung der Teilchen des Doms.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden formanisometrische Granulate im Scherfluss in zwei verschiedenen Experimenten untersucht. Zum einen wurden verschiedene Aspekte in einer Split-Bottom-Scherzelle, zum anderen in einem Silo studiert.

In der runden Split-Bottom-Scherzelle wurden Schokoladenlinsen, als Vertreter oblater Partikel und Kidneybohnen, stellvertretend für längliche Teilchen mit drei verschieden langen Achsen, analysiert. Längliche Partikel wurden bereits in [50, 51, 57, 58] studiert.

Für die abgeplatteten Linsen konnten sehr gut Teilchenpositionen und -ausrichtungen, mittels eines Matlabprogramms, ermittelt werden. Es zeigt sich in der Scherzone und angrenzenden Bereichen eine Ausrichtung am Fluss. Wird die Scherzelle von oben betrachtet, ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bei bereits untersuchten länglichen Partikeln. Außerdem stellen sich die Partikel unter Scherung auf. Hier kann ebenfalls, wie bei länglichen Partikeln, festgestellt werden, dass die Verteilung der Winkel der Linsen im Material schmaler ist als an der Oberfläche. Bei der Ausrichtung von Linsen tritt eine erhöhte Ordnung auf. Der Ordnungsparameter des Systems kann auf 0,76 in der Scherzone bestimmt werden. Außerhalb der Scherzone fällt die Ordnung deutlich, jedoch nicht auf Null, ab. Der biaxiale Ordnungsparameter ist in der Scherzone annähernd Null. Interessant wäre hier die Untersuchung weiterer Linsen unterschiedlicher Aspektverhältnisse zur Überprüfung des Analogons zu länglichen Teilchen. Hierfür sollte ein größerer Schercontainer, im Vergleich zur Teilchengröße, gewählt werden. So minimieren sich Randeffekte. Außerdem wurde das Einstellen des beschriebenen stationären Zustands aus zwei Anfangskonfigurationen studiert. Zum einen wird für den Start ein frisch eingefülltes, ungeordnetes System und zum anderen die Rotationsumkehr des Inneren der Scherzelle gewählt. Der Ordnungsparameter und die Winkelverteilungen wurden für bestimmte Gebiete der Scherzone betrachtet. Der mittlere Winkel der Partikel stellt sich dabei schneller als der stationäre Ordnungsparameter ein. Die Winkelverteilung muss also auch nach Erreichen eines stationären mittleren Winkels noch schmaler werden. Erst Untersuchungen der normierten durchschnittlichen Rotationsgeschwindigkeit der Teilchen im stationären Zustand zeigen deutliche Unterschiede zu länglichen Teilchen [58]. Für Dübel zeigt sich, dass sich die Partikel schnell drehen, wenn sie eine weit entfernte Ausrichtung im Vergleich zur Vorzugsausrichtung haben. Sie drehen sich langsam, aber in die gleiche Richtung, nahe der mittleren Orientierung. Die Geschwindigkeit der Linsen hat für Winkel, die nah am mittleren Winkel sind, ein anderes Vorzeichen als anderswo.

Für Kidneybohnen wurden ähnliche Studien durchgeführt. Hier können die Teilchen so gut bestimmt werden, dass die drei verschiedenen Achsen gefunden werden. Es ist aber nicht möglich die Richtung der Krümmung der Bohnen zu analysieren. Auch diese Teilchen zeigen eine Ausrichtung am Scherfluss. In Flussrichtung sind die Teilchen dabei im Mittel zum Inneren des Schercontainers geneigt. Außerdem zeigen die Teilchen mit dem in Scherrichtung liegenden Teil leicht nach unten. Des Weiteren sind sie mit der oberen Hälfte, wie die Linsen, leicht zum Scherzelleninneren geneigt. Die Winkelverteilungen sind erneut an der Oberfläche breiter als im Material. Der Ordnungsparameter wird im Bereich der Scherzone zu 0,75 bestimmt.

Außerhalb der Scherzone fällt der Ordnungsparameter, wie bei oblaten Granulaten, ab. Für diese Teilchen tritt ein von Null verschiedener biaxialer Ordnungsparameter von 0,12 auf. Dieser hat damit die Hälfte des möglichen Maximalwerts erreicht. Die Verteilung der vertikalen Ausrichtung ist breiter als die Verteilung des Winkels in horizontaler Richtung. Zwei weitere Ordnungsparameter konnten aus zwei Komponenten eines vierstufigen Ordnungstensors abgeschätzt werden. Unter Verwendung stärker gekrümmter Teilchen könnte betrachtet werden, wie sich die Biegung auf die Ausrichtung der Partikel auswirkt. Das Einlaufen in den stationären Zustand wird hier auch aus den zwei bei Linsen betrachteten Anfangszuständen durchgeführt. Der Winkel zwischen längster Achse und Scherrichtung zeigt, beim Einlaufen in den stationären Zustand, starke Ähnlichkeit mit dem Verhalten von länglichen Teilchen, wie Dübeln, die nur zwei unterschiedliche Ausrichtungen haben. Aus dem ungeordneten Zustand drehen sich viele Teilchen über größere Winkel zum Endzustand. Unter Umkehr der Drehrichtung wird die kleine Winkeländerung über den Nulldurchgang favorisiert.

Des Weiteren wurden Packungsdichten für unterschiedlich geformte Granulate untersucht. Für verschiedene Materialien ist ein Absinken der Packungsdichte in einer Zone mit ähnlichen Maßen der Scherzone, der Dilatationszone, erkennbar. Hier konkurrieren zwei gegenläufige Mechanismen, zum einen die Packungsdichteverringerng durch die Reynoldsdilatanz und zum anderen eine Packungsdichteerhöhung durch Ausrichtung von Partikeln. Die Dilatanz überwiegt bei den untersuchten anisometrischen Teilchen und nicht perfekt runden Kugeln, Erbsen. Für perfekt runde und gleichgroße Soft-Ball-Kugeln tritt ein anderer Effekt auf. Die Teilchen kristallisieren in hexagonal gepackten Kugel-Ketten, wobei eine langreichweitige Ordnung ersichtlich wird. Diese Kristallisation beginnt an der Kante zwischen rotierender Platte und still stehendem Boden. Kristallisationsverhalten ist für kleine Abweichungen von der perfekten Form nicht mehr vorhanden. Dies wurde an Erbsen untersucht. Für die anderen studierten Granulate tritt durch die Dilatation anfangs eine Erhöhung der Oberfläche über der Scherzone auf. Dies wird durch Reibungsminimierung, durch Partikelbewegungen aus der Scherzone heraus, zu einer Eindellung im stationären Zustand.

Im verstopften Silo, einer im Alltagsleben und in industriellen Anwendungen vorkommenden Situation eines Scherflusses, wurden ebenfalls verschiedene Granulate auf Ausrichtung, Packungsdichte, sowie die erste Lage am Ausfluss, untersucht. Im nahezu zylinderförmigen Silo fließt in der Mitte, über der Öffnung, ein Kegelstumpf an Partikeln aus. Bei einer Höhe, die dem Radius des Silos entspricht, fließen auch randnahe Partikel. Eine erhöhte Ordnung und Ausrichtung der Teilchen wird nur in fließenden Schichten gemessen. Im mittleren Bereich des Silos können für die untersuchten Granulate erhöhte Ordnungsparameter gefunden werden. Von der Mitte des Silos nach außen nimmt die Ordnung ab. Dabei steigt auch der mittlere Winkel der Teilchen zur Vertikalen. Die durchgeführten Experimente betrachten nur einen geringen Ausfluss von maximal einer Silofüllung. Es sollten Experimente zur Erforschung des Langzeitverhaltens durchgeführt werden. Damit wird geklärt, ob hier bereits der stationäre Zustand vorliegt, oder ob sich die Ordnung und Ausrichtung der Randbereiche zwischen stehendem und fließendem Granulat weiter ändert. Wird zwischen zwei Messungen nicht auf das spontane Verstopfen gewartet, sondern der Ausfluss gestoppt, könnten einzelne Partikel nachverfolgt werden. Dies würde zum Beispiel die Bestimmung der Zone größter Scherung zulassen.

Im Weiteren wurden die Packungsdichten im nahezu zylinderförmigen Silo analysiert. In nicht-fließenden Bereichen liegt für alle Granulattypen eine konstante Packungsdichte vor. In ausfließenden Zonen verringert sich, wie in der Split-Bottom-Zelle, die Packungsdichte. Besonders

in den Randbereichen des fließenden Gebiets tritt eine stark gefallene Packungsdichte auf. Hier kann die Dilatanz nicht durch eine Packungsdichteerhöhung durch Ordnung kompensiert werden. Im untersten Bereich des Silos wird eine Dichte von rund Null angenommen. Hier sind nicht bei allen Experimenten Teilchen vorhanden, da beim Verstopfen des Silos ein Dom aus verkeilten Partikeln gebildet wird. Durch diesen wird das jeweilige Granulat gehindert weiter auszufließen.

Packungsdichten verschiedener Teilchen wurden außerdem für zwei weitere Siloformen bestimmt. Im rohrförmigen Silo, mit sich verjüngendem Querschnitt, verringert sich die Packungsdichte im gesamten Container nicht sehr stark. Erste Untersuchungen zeigen, dass sich das Granulat teils als Ganzes nach unten bewegt. Im trichterförmigen Silo sinkt die Packungsdichte in allen Bereichen. Ist dieses Verhalten ähnlich, wie das des trichterförmigen fließenden Teils des zylinderförmigen Silos? Hier besteht also bei beiden Siloformen erneut die Frage, wie sich einzelne Partikel bewegen.

Zuletzt wurden verschiedene Aspekte der Dombildung betrachtet. Zuerst wurde die untere mittlere Grenze des Granulats an der Siloöffnung ermittelt. Es zeigt sich, dass der Dom, abhängig von der Teilchenform und teils vom Öffnungsdurchmesser, verschiedene Verhältnisse aus Breite zu Höhe annehmen kann. Die Domform hat für viele Teilchensorten ein Höhe-zu-Breite-Verhältnis um Eins. Es liegt damit annähernd eine Halbkugel vor. Die Dübel Q2 zeigen die größte Abweichung von dieser Form. Der Dom ist in die Höhe gestreckt. Es kann vermutet werden, dass die höhere Eckigkeit dieser Teilchen den Effekt mit verursacht. Es sollten Zwischengrößen von Dübeln mit nicht-abgerundeten Enden, zur Überprüfung, untersucht werden.

Anschließend wurde die Anzahl der Partikel im Dom mittels verschiedener Techniken in Abhängigkeit des Öffnungsradius bestimmt. Unterschiedliche Methoden liefern verschiedene Ergebnisse. Durch die Foto-Methode werden zu wenig Teilchen gefunden, da nicht alle Partikel durch die untere Öffnung des Silos gesehen werden können. Dieses Problem ist vor allem bei den Dübeln Q2 präsent, da der Dom eine sehr hohe Form und damit steile Wände hat. Bei der Auswertung der Tomogramme werden zu viele Partikel durch die Lücken der ersten Schicht gefunden. Es sollten weitere Daten mittels einer verbesserten Fototechnik, vielleicht mit einem Fischaugenobjektiv, aufgenommen werden. Diese Methode könnte schnell und preiswert, verglichen mit der Computertomografie, neue Einblicke liefern. Alternativ könnten weitere Ergebnisse der Fotomethode und der Computertomografieaufnahmen kombiniert werden. Damit könnten sich die Nachteile beider Methoden ausgleichen.

Mittels der Erkenntnis, dass etwa eine Halbkugel vorliegt, konnten die Daten gefittet werden. Die Anzahl der sich im Dom befindenden Partikel steigt quadratisch mit der Summe von Eins und dem Quotienten aus Öffnungsradius und Äquivalenzradius. Der sich aus dem Fit ergebene Flächenfüllfaktor hat bei einem Aspektverhältnis der Teilchen von Eins bis Zwei sein Minimum. Zu kleineren und größeren Aspektverhältnissen steigt er an. Damit kann vermutet werden, dass viele längliche bzw. flache Partikel mit ihrer langen Achse in das Loch am Siloende hineinzeigen.

Der Dom an einer rechteckigen Siloöffnung wurde ebenfalls untersucht. Es konnten Formeln zur Beschreibung der Anzahl der Dompartikel und dieser Anzahl normiert auf die Rechtecklänge in Abhängigkeit der Öffnungsbreite gefunden werden. Die Auswertung lässt vermuten, dass die Dübel häufig mit ihrer kurzen Seite in das Loch hineinzeigen. Es wurden nur erste Messungen durchgeführt. Ein genereller Trend sollte durch weitere Messungen gefunden werden.

Die Ausrichtung der Partikel des Doms wird als letztes überprüft. Die Winkelverteilungen zeigen ein eindeutiges Gewicht bei kleinen bis mittleren Winkeln der Teilchenachse zur Ver-

bindungslinie zwischen Partikelmitte und Siloöffnungsmitte. Es werden für viele Materialien vorrangig flacher liegende Partikel gefunden. Für Dübel Q5 und Schokoladenlinsen tritt je nach Siloöffnungsgröße ein Verhältnis zwischen flacher und steiler als die Verbindungslinie liegender Teilchen um eins auf. Die Ausrichtung der Teilchen kann damit mit der Form des Doms korreliert werden.

Mit der Ausrichtung der Teilchen kann außerdem näherungsweise ihre auf den Dom projizierte Fläche ermittelt werden. Damit sind neue Äquivalenzradien bestimmbar. Des Weiteren kann die Flächenfüllung damit erneut ermittelt werden. Beide Größen sind ähnlich zu den vorher bestimmten und zeigen damit, dass die verschiedenen Methoden geeignet sind, um den Dom zu untersuchen. Die Ausrichtung an weiteren Öffnungsformen, wie der rechteckigen, könnten überprüft werden, um ein generelles Verständnis der Ausrichtung in Silos zu erreichen.

Kurzzusammenfassung

Es wurde in zwei verschiedenen Experimenten die Ausrichtung und Ordnung formanisometrischer Granulate unter Scherfluss untersucht und nachgewiesen. Die fließenden Teilchen richten sich in einer Split-Bottom-Scherzelle und in einem ausfließenden Silo unter einem kleinen Winkel am Fluss aus. Dadurch tritt in den Materialien eine erhöhte Ordnung auf.

Genauer untersucht wurden in der Scherzelle Schokoladenlinsen als oblate Teilchen und Kidneybohnen als Partikel mit drei verschiedenen Hauptachsen. Die Schokoladenlinsen der Scherzone stellen eine lange Achse und die Kidneybohnen die zweitlängste Achse auf. Die längste Achse der Teilchen ist, von oben betrachtet, zum Drehzentrum der Zelle in Scherrichtung hin geneigt. Sie hat nur einen kleinen Winkel zum Scherfluss. Für die Schokoladenlinsen wird beim Einlaufen in den stationären Zustand die resultierende Ausrichtung schneller als die erhöhte finale Ordnung erreicht. Für Kidneybohnen sind diese beiden Prozesse etwa gleich schnell. Für sie liegt ein von null verschiedener biaxialer Ordnungsparameter vor. Die Winkelverteilungen sind in zwei Richtungen breiter als die Verteilung in tangentialer Richtung.

Für perfekte Kugeln treten unter Scherung Kristallisationseffekte auf. Es liegt eine langreichweitige Ordnung vor. Dieser Effekt verschwindet für eine kleine Abweichung von der perfekten Form.

Im nahezu zylinderförmigen Silo zeigen die längsten Achsen der Teilchen des fließenden Gebiets, unter einem kleinen Winkel zur Vertikalen, in Richtung der Siloöffnung. Im Grenzbereich zwischen bewegtem und stehendem Granulat nähert sich dieser Winkel dem Winkel zwischen den beiden Bereichen an. Es wird angenommen, dass die Grenze der Flussrichtung in diesem Gebiet entspricht. Die Teilchen schließen also stets einen kleinen Winkel mit dem Fluss ein.

In gescherten Granulaten tritt eine Auflockerung der Packung durch die Reynoldsdilatanz auf. Die Ausrichtung und Ordnung in den untersuchten Materialien kann diese nicht vollständig ausgleichen. Damit kommt es in gescherten Bereichen zu einer Packungsdichteverringering. In der Scherzelle entsteht eine Dilatationszone, die etwas breiter als die Scherzone ist. Durch die Dilatanz entsteht anfangs ein Hügel über dem gescherten Granulat. Durch Teilchenverschiebungen zur Reibungsminimierung resultiert eine Delle über der Dilatationszone.

Im Silo liegt die Dilatation im fließenden Bereich vor. In einem rohrförmigen Silo, mit sich verjüngendem Querschnitt, fließt das Granulat wahrscheinlich als Block aus.

Die ein Silo verstopfende erste Schicht konnte für viele untersuchte Partikelsorten mittels einer Halbkugelform beschrieben werden. Wird die Form der Schicht untersucht, zeigt sich ein Höhe-zu-Breite-Verhältnis um Eins. Dübel Q2 und Q8 weichen davon stark ab. Außerdem wurde die Anzahl der Partikel in dieser Schicht bestimmt. Mittels der Annahme einer Halbkugel kann die Menge der Teilchen in Abhängigkeit der Siloöffnungsgröße gefittet werden. Viele Teilchen sind im Dom so ausgerichtet, dass sie unter einem kleinen bis mittleren Winkel zur Öffnung zeigen. Für einige Materialien liegen die Partikel flacher als ihre Verbindungslinie zur Öffnung. gefunden. Die Ausrichtung der Teilchen kann damit mit der Form des Doms korreliert werden.

Summary

The orientation and order of shape anisometric granulates in shear flow were studied and shown in two different experiments. In both a Split-Bottom-shear-cell and in an outflowing silo the particles were observed to align with a small angle to the flow. Thereby high order results in the materials.

In the round shear cell, chocolate lentils, as oblate particles and Kidney beans, as particles with three different long axes, were studied. One long axis of the chocolate lentils and the second longest axis of the Kidney beans stand up under shearing. The longest axis of the particles is rotated towards the symmetry axis of the experiment container in the flow direction, as seen from above. This axis has a small angle with the shear flow. For the transient behavior of the chocolate lentils, the average orientation of the particles is reached faster than the final order parameter. For the Kidney beans the final orientation and the final order parameter are reached after a similar shearing. The Kidney beans show a nonzero biaxial order parameter. For perfect spheres, crystallization appears as long range correlation occurs which vanishes for small deviations from the perfect shape.

In a bucket shaped silo, the longest axis of the particles of the flowing zone shows to the silo opening with a small angle. In the border region between the flowing and standing part of the material, the particles have, on average, the angle of the border. The particles enclose a small angle with the streamlines.

In sheared granulates the Reynolds dilatancy wants to decrease the packing fraction. It was observed that the orientation and order cannot compensate this effect fully in the analyzed granulates. The sheared regions show a decrease of the packing fraction and in the shear cell, a dilatation zone occurs, which is a bit wider than the shear zone. Therefore the surface in this and the neighboring regions is increased and afterwards the particles get aligned. The friction is decreased by pushing material to the side, hence the surface above sinks.

In the bucket shaped silo, the dilatation is localized in the flowing zone. In the tube shaped silo the granulate is most likely flowing as a block.

The layer which blocks the silo at the opening has, for many of the used materials, a hemispherical shape. For many granulate types, the dome has an aspect ratio (height to width) of approximately one. The number of particles in the dome was determined with respect to the orifice size. This number can be interpolated as a function of the opening size with the assumption of a half sphere. Finally the orientations of the particles in the dome were determined, where a clear trend of the long axis to the middle of the opening is visible. The particles lay flatter than their connecting line to the silo opening for some materials. Therefore the orientation of the particles can be correlated with the shape of the dome.

Literaturverzeichnis

- [1] Tamás Börzsönyi, Thomas C. Halsey, and Robert E. Ecke. Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers. *Phys. Rev. Lett.*, 94:208001, May 2005.
- [2] O. Pouliquen. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Phys. Fluids*, 11:542–548, 1999.
- [3] C. Mankoc, A. Janda, R. Arévalo, J. M. Pastor, I. Zuriguel, A. Garcimartín, and Maza D. The flow rate of granular materials through an orifice. *Granular Matter*, 9:407–414, 2007.
- [4] Iker Zuriguel, Angel Garcimartín, Diego Maza, Luis A. Pugnaloni, and J. M. Pastor. Jamming during the discharge of granular matter from a silo. *Phys. Rev. E*, 71:051303, May 2005.
- [5] Kiwing To and Pik-Yin Lai. Jamming pattern in a two-dimensional hopper. *Phys. Rev. E*, 66:011308, Jul 2002.
- [6] J. Atwell and J. S. Olafsen. Anisotropic dynamics in a shaken granular dimer gas experiment. *Phys. Rev. E*, 71:062301, Jun 2005.
- [7] L. J. Daniels, Y. Park, T. C. Lubensky, and D. J. Durian. Dynamics of gas-fluidized granular rods. *Phys. Rev. E*, 79:041301, Apr 2009.
- [8] K. Harth, U. Kornek, T. Trittel, U. Strachauer, S. Höme, K. Will, and R. Stannarius. Granular gases of rod-shaped grains in microgravity. *Phys. Rev. Lett.*, 110:144102, Apr 2013.
- [9] Paul Chaikin. *Soft and Fragile Matter: Nonequilibrium Dynamics, Metastability and Flow (PBK), Kapitel: Thermodynamics and hydrodynamics of hard spheres; the role of gravity*. CRC Press, 2000. Editor: M. E. Cates, M.R. Evans.
- [10] Fernando X. Villarruel, Benjamin E. Lauderdale, Daniel M. Mueth, and Heinrich M. Jaeger. Compaction of rods: Relaxation and ordering in vibrated, anisotropic granular material. *Phys. Rev. E*, 61:6914–6921, Jun 2000.
- [11] Philippe Ribière, Patrick Richard, Renaud Delannay, and Daniel Bideau. Importance of convection in the compaction mechanisms of anisotropic granular media. *Phys. Rev. E*, 71(1):011304, Jan 2005.
- [12] Vijay Narayan, Narayanan Menon, and Sriram Ramaswamy. Nonequilibrium steady states in a vibrated-rod monolayer: tetratic, nematic, and smectic correlations. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(01):P01005, 2006.
- [13] M. Ramaioli, L. Pournin, and Th. M. Liebling. Vertical ordering of rods under vertical vibration. *Phys. Rev. E*, 76(2):021304, Aug 2007.

- [14] Igor S. Aranson, Dmitri Volfson, and Lev S. Tsimring. Swirling motion in a system of vibrated elongated particles. *Phys. Rev. E*, 75:051301, May 2007.
- [15] Z.Y. Zhou, D. Pinson, R.P. Zou, and A.B. Yu. Discrete particle simulation of gas fluidization of ellipsoidal particles. *Chemical Engineering Science*, 66(23):6128 – 6145, 2011.
- [16] Vidar Frette, Kim Christensen, Anders Malthe-Sørensen, Jens Feder, Torstein Jøssang, and Paul Meakin. Avalanche dynamics in a pile of rice. *Nature*, 379(6560):49–52, 1996.
- [17] H. Ehrentraut and A. Chrzanowska. *Dynamic response of granular and porous materials under large and catastrophic deformations: Induced Anisotropy in Rapid Flows of Nonspherical Granular Materials*. Berlin [u.a.] : Springer, 2003.
- [18] Harald Ehrentraut. *Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment: Anisotropic Fluids: From Liquid Crystals to Granular Materials*. Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [19] D. V. Denisov, Y. Y. Villanueva, K. A. Lőrincz, S. May, and R. J. Wijngaarden. Relation between self-organized criticality and grain aspect ratio in granular piles. *Phys. Rev. E*, 85:051309, May 2012.
- [20] Harald Ehrentraut and Siegfried Hess. Viscosity coefficients of partially aligned nematic and nematic discotic liquid crystals. *Phys. Rev. E*, 51(3):2203–2212, Mar 1995.
- [21] Charles S. Campbell. Elastic granular flows of ellipsoidal particles. *Phys. Fluids*, 23:013306–013306–10, 2011.
- [22] R.C. Hidalgo, D. Kadau, T. Kanazaki, and H.J. Herrmann. Granular packings of cohesive elongated particles. *Granular Matter*, 14(2):191–196, 2012.
- [23] Tamá Telbisz Dávid Karátson, Orsolya Sztanó. Preferred clast orientation in volcaniclastic mass-flow deposits: Application of a new photo-statistical method. *Journal of Sedimentary Research*, 72(6):823–835, November 2002.
- [24] B. J. Buchalter and R. Mark Bradley. Orientational order in random packings of ellipses. *Phys. Rev. A*, 46:3046–3056, Sep 1992.
- [25] Aleksandar Donev, Ibrahim Cisse, David Sachs, Evan A. Variano, Frank H. Stillinger, Robert Connelly, Salvatore Torquato, and P. M. Chaikin. Improving the density of jammed disordered packings using ellipsoids. *Science*, 303(5660):990–993, 2004.
- [26] S Sacanna, L Rossi, A Wouterse, and AP Philipse. Observation of a shape-dependent density maximum in random packings and glasses of colloidal silica ellipsoids. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 19(37):376108, 2007.
- [27] S. Torquato and F. H. Stillinger. Jammed hard-particle packings: From kepler to bernal and beyond. *Rev. Mod. Phys.*, 82:2633–2672, Sep 2010.
- [28] G. W. Delaney and P. W. Cleary. The packing properties of superellipsoids. *EPL (Europhysics Letters)*, 89(3):34002, 2010.

-
- [29] Andriy V. Kyrylyuk, Marie Anne van de Haar, Laura Rossi, Alan Wouterse, and Albert P. Philipse. Isochoric ideality in jammed random packings of non-spherical granular matter. *Soft Matter*, 7:1671–1674, 2011.
- [30] Reza M. Baram and Pedro G. Lind. Deposition of general ellipsoidal particles. *Phys. Rev. E*, 85:041301, Apr 2012.
- [31] Chengjie Xia, Kuan Zhu, Yixin Cao, Haohua Sun, Binqun Kou, and Yujie Wang. X-ray tomography study of the random packing structure of ellipsoids. *Soft Matter*, 10:990–996, 2014.
- [32] Weining Man, Aleksandar Donev, Frank H. Stillinger, Matthew T. Sullivan, William B. Russel, David Heeger, Souheil Inati, Salvatore Torquato, and P. M. Chaikin. Experiments on random packings of ellipsoids. *Phys. Rev. Lett.*, 94(19):198001, May 2005.
- [33] Rui-Ping Zou, Xin-Yu Lin, Ai-Bing Yu, and Patrick Wong. Packing of cylindrical particles with a length distribution. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(3):646–652, 1997.
- [34] Wenli Zhang. *Experimental and Computational Analysis of random Cylinder Packings with Applications*. PhD thesis, Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2006.
- [35] Albert P. Philipse. The random contact equation and its implications for (colloidal) rods in packings, suspensions, and anisotropic powders. *Langmuir*, 12:1127–1133, 1996.
- [36] Albert P. Philipse. The random contact equation and its implications for (colloidal) rods in packings, suspensions, and anisotropic powders. *Langmuir*, 12:5971–5971, 1996.
- [37] S. Torquato, T. M. Truskett, and P. G. Debenedetti. Is random close packing of spheres well defined? *Phys. Rev. Lett.*, 84(10):2064–2067, Mar 2000.
- [38] G D Scott and D M Kilgour. The density of random close packing of spheres. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2(863), June 1969.
- [39] Daniel Howell, R. P. Behringer, and Christian Veje. Stress fluctuations in a 2d granular couette experiment: A continuous transition. *Phys. Rev. Lett.*, 82:5241–5244, Jun 1999.
- [40] D. M. Mueth and et al. Signatures of granular microstructure in dense shear flows. *Nature*, 406:385–389, 2000.
- [41] Martin van Hecke Joshua A. Dijksman. Granular flows in split-bottom geometries. *Soft Matter*, 6:2901 – 2907, 2010.
- [42] Geert Wortel, Tamas Borzsonyi, Ellak Somfai, Sandra Wegner, Balazs Szabo, Ralf Stanarius, and Martin van Hecke. Heaping, secondary flows and broken symmetry in flows of elongated granular particles. *Soft Matter*, 11:2570–2576, 2015.
- [43] K. Sakaie, D. Fenistein, T. J. Carroll, M. van Hecke, and P. Umbanhowar. Mr imaging of reynolds dilatancy in the bulk of smooth granular flows. *EPL (Europhysics Letters)*, 84(3):38001, 2008.

- [44] Rüdiger Schwarze, Anton Gladkyy, Fabian Uhlig, and Stefan Luding. Rheology of weakly wetted granular materials: a comparison of experimental and numerical data. *Granular Matter*, 15(4):455–465, 2013.
- [45] Somayeh Farhadi and Robert P. Behringer. Dynamics of sheared ellipses and circular disks: Effects of particle shape. *Phys. Rev. Lett.*, 112:148301, Apr 2014.
- [46] T. Unger, J. Török, J. Kertész, and D. E. Wolf. Shear band formation in granular media as a variational problem. *Phys. Rev. Lett.*, 92(21):214301, May 2004.
- [47] J. Török, T. Unger, J. Kertész, and D. E. Wolf. Shear zones in granular materials: Optimization in a self-organized random potential. *Phys. Rev. E*, 75(1):011305, Jan 2007.
- [48] E. A. Jagla. Finite width of quasistatic shear bands. *Phys. Rev. E*, 78(2):026105, Aug 2008.
- [49] O. Reynolds. Experiments showing dilatancy, a property of granular material, possibly connected with gravitation. *Proceedings of the Royal Institution of Great Britain*, 2:354–363, 1886.
- [50] Sandra Wegner, Tamas Börzsönyi, Tomasz Bien, Georg Rose, and Ralf Stannarius. Alignment and dynamics of elongated cylinders under shear. *Soft Matter*, 8:10950–10958, 2012.
- [51] Sandra Wegner. Experimentelle Untersuchung anisometrischer Granulate unter Scherung. Master’s thesis, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Naturwissenschaften, Institut für Experimentelle Physik, Abteilung Nichtlineare Phänomene, 2011.
- [52] Karen E. Daniels and Robert P. Behringer. Hysteresis and competition between disorder and crystallization in sheared and vibrated granular flow. *Phys. Rev. Lett.*, 94:168001, Apr 2005.
- [53] Karen E. Daniels and Robert P. Behringer. Characterization of a freezing/melting transition in a vibrated and sheared granular medium. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2006(07):P07018, 2006.
- [54] J.-C. Tsai, G. A. Voth, and J. P. Gollub. Internal granular dynamics, shear-induced crystallization, and compaction steps. *Phys. Rev. Lett.*, 91:064301, Aug 2003.
- [55] J.-C. Tsai and J. P. Gollub. Slowly sheared dense granular flows: Crystallization and nonunique final states. *Phys. Rev. E*, 70:031303, Sep 2004.
- [56] Andreea Panaitescu, K. Anki Reddy, and Arshad Kudrolli. Nucleation and crystal growth in sheared granular sphere packings. *Phys. Rev. Lett.*, 108:108001, Mar 2012.
- [57] Tamás Börzsönyi, Balázs Szabó, Gábor Törös, Sandra Wegner, János Török, Ellák Somfai, Tomasz Bien, and Ralf Stannarius. Orientational order and alignment of elongated particles induced by shear. *Phys. Rev. Lett.*, 108:228302, May 2012.

-
- [58] Tamás Börzsönyi, Balázs Szabó, Sandra Wegner, Kirsten Harth, János Török, Ellák Somfai, Tomasz Bien, and Ralf Stannarius. Shear-induced alignment and dynamics of elongated granular particles. *Phys. Rev. E*, 86:051304, Nov 2012.
- [59] Paolo Biscari, Gaetano Napoli, and Stefano Turzi. Bulk and surface biaxiality in nematic liquid crystals. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, 74:031708, 2006.
- [60] J. Gennes, P.G. de ; Prost. *The Physics of Liquid Crystals*. Oxford University Press, 2. edition, 1993.
- [61] Martin A. Bates and Geoffrey R. Luckhurst. Biaxial nematic phases and v-shaped molecules: A monte carlo simulation study. *Phys. Rev. E*, 72:051702, Nov 2005.
- [62] Y Guo, C Wassgren, W Ketterhagen, B Hancock, B James, and J Curtis. A numerical study of granular shear flows of rod-like particles using the discrete element method. *Journal of Fluid Mechanics*, 713:1, 2012.
- [63] Y. Guo, C. Wassgren, B. Hancock, W. Ketterhagen, and J. Curtis. Granular shear flows of flat disks and elongated rods without and with friction. *Physics of Fluids*, 25(6):-, 2013.
- [64] Mauricio Botton, Emilien Azéma, Nicolas Estrada, Farhang Radjaï, and Arcesio Lizcano. Quasistatic rheology and microstructural description of sheared granular materials composed of platy particles. *Phys. Rev. E*, 87:032206, Mar 2013.
- [65] A A Peña, R García-Rojo, and H J Herrmann. Influence of particle shape on sheared dense granular media. *Granular Matter*, 9(3-4):12, 2006.
- [66] Cegeo, B. Saint-Cyr, K. Szarf, C. Voivret, E. Azéma, V. Richefeu, J.-Y. Delenne, G. Combe, C. Noguier-Lehon, P. Villard, P. Sornay, M. Chaze, and F. Radjai. Particle shape dependence in 2d granular media. *EPL (Europhysics Letters)*, 98(4):44008, 2012.
- [67] Emilien Azéma and Farhang Radjaï. Stress-strain behavior and geometrical properties of packings of elongated particles. *Phys. Rev. E*, 81:051304, May 2010.
- [68] Emilien Azéma, Nicolas Estrada, and Farhang Radjaï. Nonlinear effects of particle shape angularity in sheared granular media. *Phys. Rev. E*, 86:041301, Oct 2012.
- [69] Hassan Masoud, Howard A. Stone, and Michael J. Shelley. On the rotation of porous ellipsoids in simple shear flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 733, 10 2013.
- [70] Theodore A. Marschall, Scott V. Franklin, and S. Teitel. Compression- and shear-driven jamming of u-shaped particles in two dimensions. *Granular Matter*, 17:121 – 133, 2015.
- [71] Tamás Börzsönyi and Ralf Stannarius. Granular materials composed of shape-anisotropic grains. *Soft Matter*, 9(31):7401–7418, 2013.
- [72] Alvaro Janda, Iker Zuriguel, Angel Garcimartin, and Diego Maza. Clogging of granular materials in narrow vertical pipes discharged at constant velocity. *Granular Matter*, pages 1–7, 2015.

- [73] M. A. Aguirre, R. De Schant, and J.-C. Géminard. Granular flow through an aperture: Influence of the packing fraction. *Phys. Rev. E*, 90:012203, Jul 2014.
- [74] Dirk Helbing, Lubos Buzna, Anders Johansson, and Torsten Werner. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions. *Transportation science*, 39(1):1–24, 2005.
- [75] B. S. Kerner and H. Rehborn. Experimental properties of complexity in traffic flow. *Phys. Rev. E*, 53:R4275–R4278, May 1996.
- [76] Takashi Nagatani. The physics of traffic jams. *Reports on Progress in Physics*, 65(9):1331, 2002.
- [77] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407:487–490, 2000.
- [78] A. Garcimartín, J. M. Pastor, L. M. Ferrer, J. J. Ramos, C. Martín-Gómez, and I. Zuriguel. Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck. *Phys. Rev. E*, 91:022808, Feb 2015.
- [79] G. Gutiérrez, C. Colonnello, P. Boltenhagen, J. R. Darias, R. Peralta-Fabi, F. Brau, and E. Clément. Silo collapse under granular discharge. *Phys. Rev. Lett.*, 114:018001, Jan 2015.
- [80] S. Dorbolo, L. Maquet, M. Brandenbourger, F. Ludewig, G. Lumay, H. Caps, N. Vandewalle, S. Rondia, M. Mélard, J. van Loon, A. Dowson, and S. Vincent-Bonnieu. Influence of the gravity on the discharge of a silo. *Granular Matter*, 15(3):263–273, 2013.
- [81] Jintang Li, Paul A Langston, Colin Webb, and Tom Dyakowski. Flow of sphero-disc particles in rectangular hoppers- a dem and experimental comparison in 3d. *Chemical Engineering Science*, 59(24):5917 – 5929, 2004.
- [82] Roberto Arévalo, Iker Zuriguel, Diego Maza, and Angel Garcimartín. Role of driving force on the clogging of inert particles in a bottleneck. *Phys. Rev. E*, 89:042205, Apr 2014.
- [83] Paul W. Cleary. The effect of particle shape on hopper discharge. *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, pages 71–76, 1999.
- [84] Paul W Cleary and Mark L Sawley. Dem modelling of industrial granular flows: 3d case studies and the effect of particle shape on hopper discharge. *Applied Mathematical Modelling*, 26(2):89 – 111, 2002.
- [85] Baosheng Jin, He Tao, and Wenqi Zhong. Flow behaviors of non-spherical granules in rectangular hopper. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(6):931 – 939, 2010.
- [86] He Tao, Baosheng Jin, Wenqi Zhong, Xiaofang Wang, Bing Ren, Yong Zhang, and Rui Xiao. Discrete element method modeling of non-spherical granular flow in rectangular hopper. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2):151 – 158, 2010.

-
- [87] Summer Saraf and Scott V. Franklin. Power-law flow statistics in anisometric (wedge) hoppers. *Phys. Rev. E*, 83:030301, Mar 2011.
- [88] Iker Zuriguel, Daniel Ricardo Parisi, Raúl Cruz Hidalgo, Celia Lozano, Alvaro Janda, Paula Alejandra Gago, Juan Pablo Peralta, Luis Miguel Ferrer, Luis Ariel Pugnaroni, Eric Clément, Diego Maza, Ignacio Pagonabarraga, and Angel Garcimartín. Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks. *Scientific Reports*, 4, 2014.
- [89] S. M. Rubio-Largo, A. Janda, D. Maza, I. Zuriguel, and R. C. Hidalgo. Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Phys. Rev. Lett.*, 114:238002, Jun 2015.
- [90] A. Janda, D. Maza, A. Garcimartín, E. Kolb, J. Lanuza, and E. Clément. Unjamming a granular hopper by vibration. *EPL*, 87:24002, 2009.
- [91] Celia Lozano, Geoffroy Lumay, Iker Zuriguel, R. C. Hidalgo, and Angel Garcimartín. Breaking arches with vibrations: The role of defects. *Phys. Rev. Lett.*, 109:068001, Aug 2012.
- [92] Cristian Mankoc, Angel Garcimartín, Iker Zuriguel, Diego Maza, and Luis A. Pugnaroni. Role of vibrations in the jamming and unjamming of grains discharging from a silo. *Phys. Rev. E*, 80:011309, Jul 2009.
- [93] H. Lastakowski, J.-C. Géminard, and V. Vidal. Granular friction: Triggering large events with small vibrations. *Scientific Reports*, 5, 2015. cited By 0.
- [94] C. Lozano, I. Zuriguel, and A. Garcimartín. Stability of clogging arches in a silo submitted to vertical vibrations. *Phys. Rev. E*, 91:062203, Jun 2015.
- [95] J. Favier, M. Abbaspour-Fard, and M. Kremmer. Modeling nonspherical particles using multisphere discrete elements. *Journal of Engineering Mechanics*, 127:971–977, 2001.
- [96] R.C. Hidalgo, C. Lozano, I. Zuriguel, and A. Garcimartín. Force analysis of clogging arches in a silo. *Granular Matter*, 15(6):841–848, 2013.
- [97] Angel Garcimartín, Iker Zuriguel, Luis A. Pugnaroni, and Alvaro Janda. Shape of jamming arches in two-dimensional deposits of granular materials. *Phys. Rev. E*, 82:031306, Sep 2010.
- [98] J. Tang and R.P. Behringer. How granular materials jam in a hopper. *Chaos*, 21:041107, 2011.
- [99] Kiwing To, Pik-Yin Lai, and H. K. Pak. Jamming of granular flow in a two-dimensional hopper. *Phys. Rev. Lett.*, 86:71–74, Jan 2001.
- [100] R.O. Unac, A.M. Vidales, and L.A. Pugnaroni. The effect of the packing fraction on the jamming of granular flow through small apertures. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 04:P04008, 2012.
- [101] K. Grudzien, M. Niedostatkiewicz, J. Adrien, J. Tejchman, and E. Maire. Quantitative estimation of volume changes of granular materials during silo flow using x-ray tomography. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(1):59 – 67, 2011.

- [102] Krzysztof Grudzien, Maciej Niedostatkiwicz, Jerome Adrien, Eric Maire, and Laurent About. Analysis of the bulk solid flow during gravitational silo emptying using x-ray and ct tomography. *Powder Technology*, 224(0):196 – 208, 2012.
- [103] M. Tsukahara, S. Mitrovic, V. Gajdosik, G. Margaritondo, L. Pournin, M. Ramaioli, D. Sage, Y. Hwu, M. Unser, and Th. M. Liebling. Coupled tomography and distinct-element-method approach to exploring the granular media microstructure in a jamming hourglass. *Phys. Rev. E*, 77:061306, Jun 2008.
- [104] T. Kanzaki, M. Acevedo, I. Zuriguel, I. Pagonabarraga, D. Maza, and R.C. Hidalgo. Stress distribution of faceted particles in a silo after its partial discharge. *The European Physical Journal E*, 34(12), 2011.
- [105] C. C. Thomas and D. J. Durian. Fraction of clogging configurations sampled by granular hopper flow. *Phys. Rev. Lett.*, 114:178001, Apr 2015.
- [106] C. C. Thomas and D. J. Durian. Geometry dependence of the clogging transition in tilted hoppers. *Phys. Rev. E*, 87:052201, May 2013.
- [107] Francisco Vivanco, Sergio Rica, and Francisco Melo. Dynamical arching in a two dimensional granular flow. *Granular Matter*, 14(5):563–576, 2012.
- [108] J.F. Wambaugh, R.R. Hartley, and R.P. Behringer. Force networks and elasticity in granular silos. *The European Physical Journal E*, 32(2):135–145, 2010.
- [109] Dr.-Ing. Regina Pohle. *Computerunterstützte Bildanalyse zur Auswertung medizinischer Bilddaten*. Habilitationsschrift, Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004.
- [110] Becker, Boortz, Dietrich, Engelmann, Ernst, Fanghänel, and Höhne. *Formeln und Tabellen*. Paetec, 11. edition, 2004.
- [111] Siemens. Werbematerial der Firma Siemens zum Produkt Multiachsen-System Siemens Artis zeego.
- [112] Iam-Choon Khoo. *Liquid crystals*, volume 2. John Wiley & Sons, 2007.
- [113] Ch. Gähwiller. Temperature dependence of flow alignment in nematic liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.*, 28:1554–1556, Jun 1972.
- [114] K. Skarp, S. T. Lagerwall, B. Stebler, and D. McQueen. Flow alignment in cyanobiphenyl liquid crystals. *Physica Scripta*, 19(4):339, 1979.
- [115] W. W. Beens and W. H. de Jeu. The flow alignment of some nematic liquid crystals. *The Journal of Chemical Physics*, 82(8):3841–3846, 1985.
- [116] Zhang, Thompson, Reed, and Beenken. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles. *Chemical Engineering Science*, 61:8060–8074, 2006.
- [117] A. S. Clarke and J. D. Wiley. Numerical simulation of the dense random packing of a binary mixture of hard spheres: Amorphous metals. *Phys. Rev. B*, 35:7350–7356, May 1987.

- [118] Sandra Wegner, Ralf Stannarius, Axel Boese, Georg Rose, Balazs Szabo, Ellak Somfai, and Tamas Borzsonyi. Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials. *Soft Matter*, 10:5157–5167, 2014.
- [119] A. Ashour, S. Wegner, T. Trittel, T. Borzsonyi, and R. Stannarius. Outflow and clogging of shape-anisotropic grains in hoppers with small apertures. *Soft Matter*, 13:402–414, 2017.
- [120] G. W. Gray, V Vill, H. W. Spiess, D. Demus, and J. W. Goodby, editors. *Physical Properties of Liquid Crystals*. Wiley-VCH, 1999.

A Anhang

A.1 Herleitung der Scherung aus der Scherrate

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ kann mittels Formel A.1 berechnet werden.

$$\dot{\gamma} = \frac{dv(r)}{dr} - \frac{v(r)}{r} \quad (\text{A.1})$$

r - Radius

v - tangentielle Geschwindigkeit

Mit der Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Platte, Ω , ergibt sich die Scherung γ mit dem Drehwinkel der Platte α und damit mit $\alpha = \Omega \cdot t$ zu:

$$\begin{aligned} \gamma &= \int \left(\frac{dv(r)}{dr} - \frac{v(r)}{r} \right) \frac{1}{\Omega} d\alpha \\ &= \int \left(\frac{dv(r)}{dr} \frac{1}{\Omega} \right) d\alpha - \int \frac{v(r)}{r} \frac{1}{\Omega} d\alpha \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Die tangentielle Geschwindigkeit einzelner Teilchen berechnet sich aus ihrer Verschiebung wie folgt:

$$\frac{v}{\Omega} = \frac{ds}{d\alpha} \quad (\text{A.3})$$

Damit resultiert, dass mit der Verschiebung einzelner Teilchen zwischen den einzelnen Rotationsschritten und dem dazugehörigen Zellenradius und der Ableitung der Verschiebung, die Scherung berechnet werden kann.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{d}{dr} \left(\frac{v(r)d\alpha}{\Omega} \right) - \int \frac{ds}{r} \\ &= \frac{d}{dr} \frac{ds}{dr} - \int \frac{ds}{r} \\ &= \frac{d(s(\alpha, r) - s(\alpha, 0))}{dr} - \frac{s(\alpha, r) - s(\alpha, 0)}{r} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

A.2 Umrechnung Drehwinkel des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle in Scherung

In Tabelle A.1 wird die Umrechnung zwischen dem Drehwinkel des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle und der Scherung für verschiedene Experimentserien angegeben.

Tabelle A.1: Umrechnung zwischen Drehwinkel α des Innenteils der Split-Bottom-Scherzelle und der Scherung γ nach Formel $\alpha \cdot x = \gamma$

Material	Messung	x
Linsen	Einlauf aus ungeordnetem System 1	0,0742
	Einlauf aus ungeordnetem System 2	0,0697
	Umkehr Drehrichtung 1	0,0654
	Umkehr Drehrichtung 2	0,0694
Bohnen	Einlauf aus ungeordnetem System	0,1614
	Umkehr Drehrichtung	0,1201

A.3 Größenbestimmung des biaxialen Ordnungsparameters D

Um den größt- und kleinstmöglichen Wert des biaxialen Ordnungsparameters D zu bestimmen, wird zunächst betrachtet in welchen Bereichen die Eigenwerte des Ordnungstensors

$$T_{ij} = \frac{3}{2N} \sum_{n=1}^N \left(u_i^{(n)} u_j^{(n)} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \right) \quad (\text{A.5})$$

liegen können. Es zeigt sich, da der erste Wert in der Klammer maximal Eins und minimal Null sein kann, dass die Eigenwerte zwischen -0,5 und 1 liegen können. Der Tensor kann auch in Hauptachsenform dargestellt werden [120]:

$$\mathbf{T} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(X - Y) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}(X + Y) & 0 \\ 0 & 0 & X \end{pmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Mit:

$$\begin{aligned} S &= \frac{3}{2} X \\ D &= \frac{3}{2} Y \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Da S bzw. X per Definition der größte Eigenwert ist und der Ordnungstensor spurlos ist, gelten:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}(X - Y) &\leq 0 \\ Y &\leq X \\ D &\leq S \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Außerdem darf kein Eigenwert des Tensors kleiner als -0,5 sein. Damit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \left(-\frac{1}{2}(X + Y) \right) &\geq -\frac{1}{2} \\ X + Y &\leq \frac{2}{3} \\ D &\leq 1 - S \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Der Maximalwert von D ist damit von S abhängig:

$$\begin{aligned} D &\leq S, \quad S \leq 0,5 \\ D &\leq 1 - S, \quad S \geq 0,5 \end{aligned} \tag{A.10}$$

A.4 Methode zur Bestimmung fließender Schichten im Silo

Um zu betrachten, welche Granulatgebiete im Silo mit runder Öffnung fließen, werden je 30 Tomogramme pro Material und Öffnungsdurchmesser untersucht. Zuerst werden je drei aufeinander folgende Aufnahmen so gedreht, dass im unteren Bereich an den Wänden, die Partikel genau übereinander liegen. Es wird die Anzahl drei gewählt, da zwischen den Aufnahmen ca. eine viertel Entleerung lag. Wenn die Hälfte des Materials ausgeflossen war, wurde der Behälter neu gefüllt. Im unteren Bereich, nahe der Silowand, kann bei einem eimerförmigen Silo davon ausgegangen werden, dass die Teilchen stehen bleiben. Dann werden Differenzen dieser Tomogramme gebildet, um zu ermitteln, wo es zu Abweichungen nach dem Ausfluss von Teilchen kommt. Hier kann nur festgestellt werden, ob es eine Änderung gab, wenn sich für einen Voxel der Wert von Null auf Eins, kein Teilchen an dieser Stelle zu Partikel vorhanden, oder umkehrt, ändert. Ob das gleiche Teilchen vorhanden ist, ist nicht überprüfbar. Dazu fließt zu viel Granulat zwischen einzelnen Tomogrammen aus. Die Partikel bewegen sich zu weit. Um diesen Effekt etwas zu kompensieren, wird jeder Voxel über eine kleine Nachbarumgebung gemittelt. Alle so ermittelten Differenz-Volumina werden anschließend addiert. Im Weiteren wird eine Mittelung um die Symmetrieachse des Silos vorgenommen. Tritt der Wert Null im Endbild auf, liegt in jedem Satz der drei aufeinander folgenden Tomogramm auf der betrachteten Höhe und in diesem Abstand zur Mitte des Silos keine Veränderung vor. Der Wert Eins stellt die maximale Veränderung zwischen den Tomogrammen dar. Nach der Addition der Differenzbilder die aus den Drei-Tomogramm-Sätzen entstehen, wird auf den maximalen Wert normiert.

A.5 Ordnung und Orientierung im Silo für Dübel Q8, Q3, Q2 und Linsen

Für vier Materialien, Dübel Q8, Q3, Q2 und Linsen, wird der Ordnungsparameter und der Winkel zur vertikalen Achse für verschiedene Bereiche des Silos in Abbildung A.3, A.2, A.3 und A.4 für einen Öffnungsdurchmesser von $d = 64$ mm, $d = 35$ mm und $d = 30$ mm angegeben. S und ϑ werden über den Ordnungstensor ermittelt.

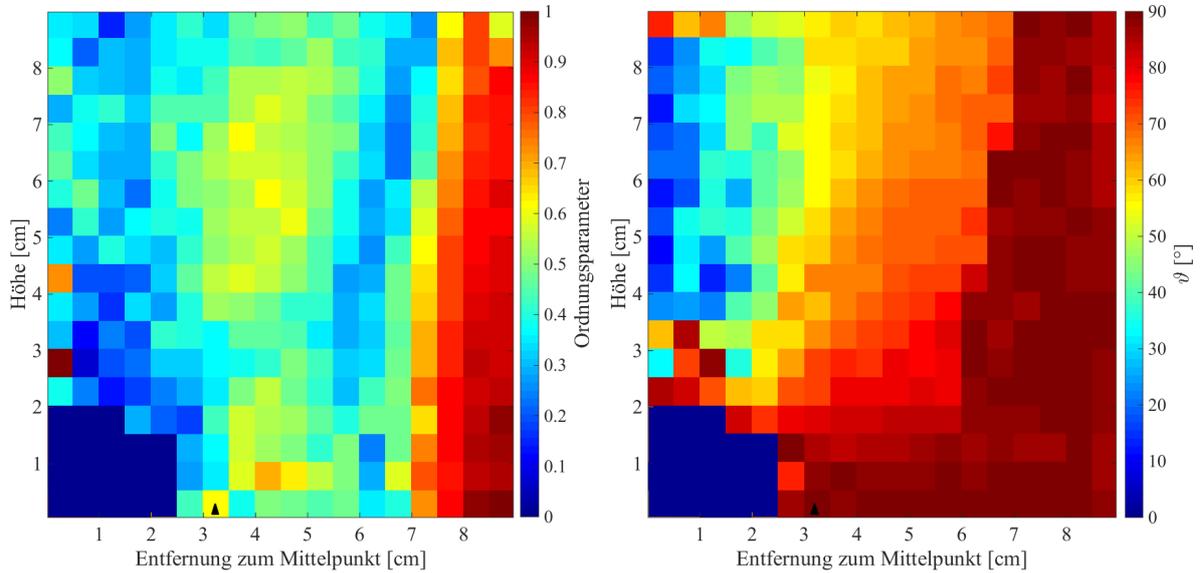


Abbildung A.1: Ordnungsparameter S und mittlerer Winkel der langen Teilchenachse zur vertikalen Achse ϑ für Dübel Q8 im eimerförmigen Silo. Das schwarze Dreieck markiert den Öffnungsradius.

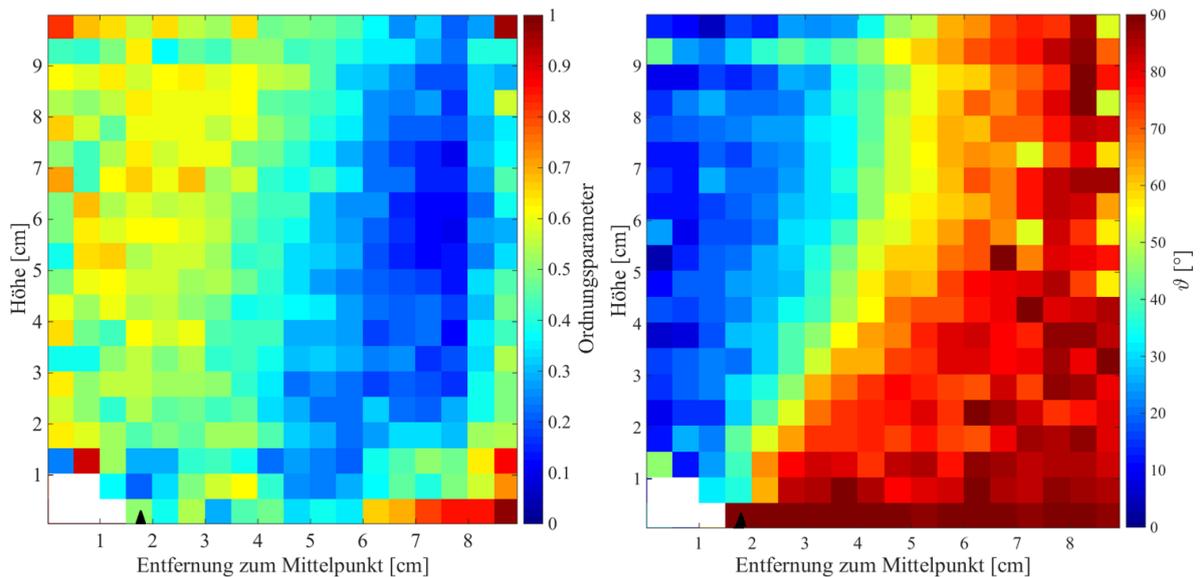


Abbildung A.2: Ordnungsparameter S und mittlerer Winkel der langen Teilchenachse zur vertikalen Achse ϑ für Dübel Q3 im eimerförmigen Silo. Das schwarze Dreieck markiert den Öffnungsradius.

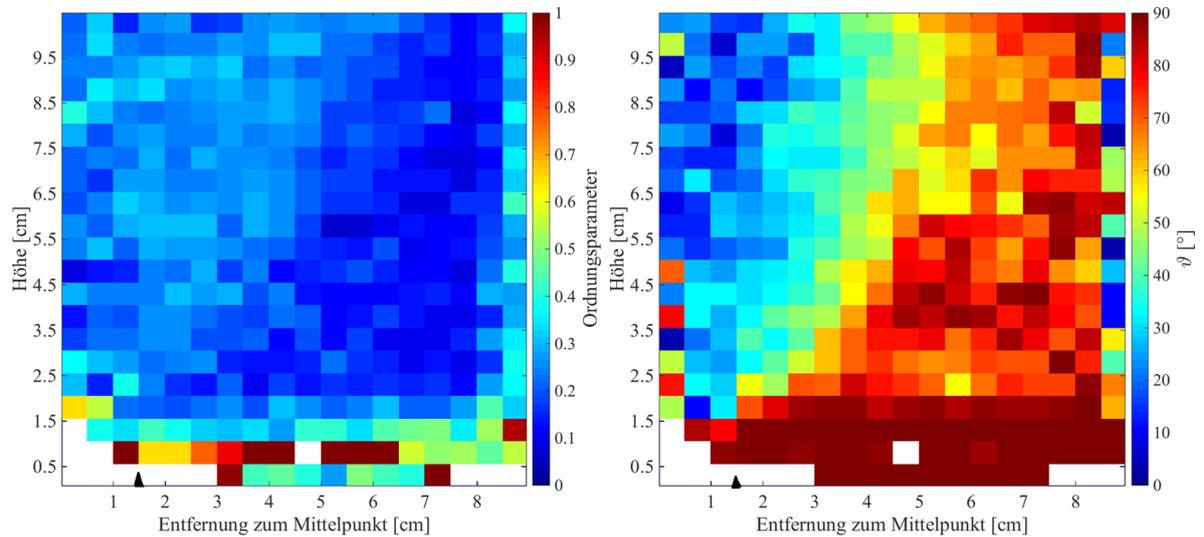


Abbildung A.3: Ordnungsparameter S und mittlerer Winkel der langen Teilchenachse zur vertikalen Achse ϑ für Dübel Q2 im eimerförmigen Silo. Das schwarze Dreieck markiert den Öffnungsradius.

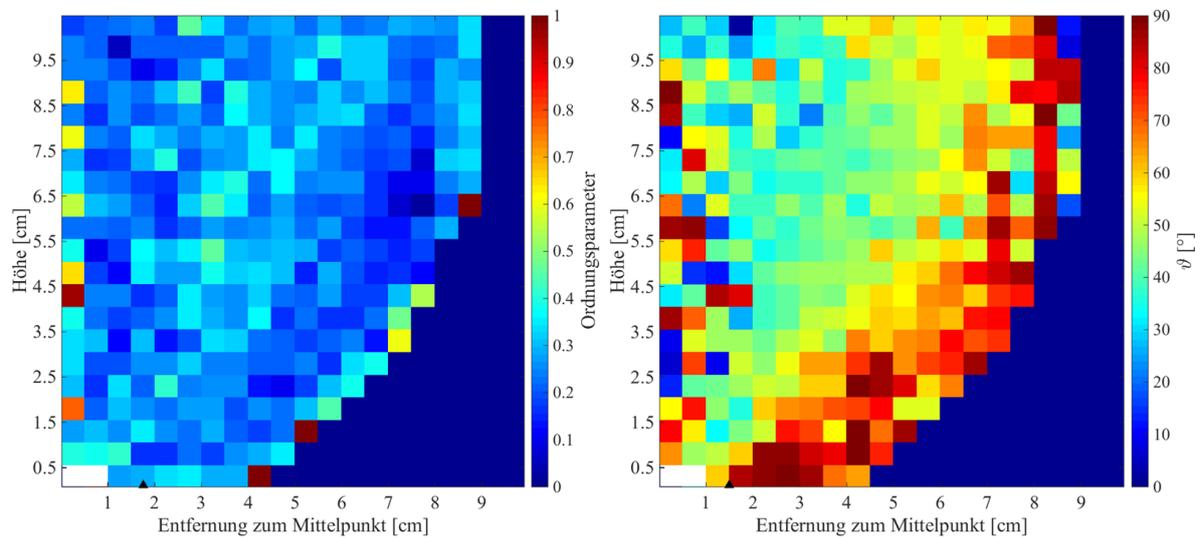


Abbildung A.4: Ordnungsparameter S und mittlerer Winkel der kurzen Teilchenachse zur vertikalen Achse ϑ für Schokoladenlinsen im eimerförmigen Silo. Das schwarze Dreieck markiert den Öffnungsradius.

A.6 Wissenschaftliche Veröffentlichungen und Leistungen

Veröffentlichungen

- G. Wortel, T. Börzsönyi, E. Somfai, S. Wegner, B. Szabó, R. Stannarius, M. van Hecke. *Heaping, Secondary Flows and Broken Symmetry in Flows of Elongated Granular Particles*, Soft Matter, 11 2570 (2015).
- K. Harth, T. Trittel, K. May, S. Wegner, R. Stannarius. *Three-dimensional (3D) experimental realization and observation of a granular gas in microgravity*, Adv. Space Res., 55 1901 (2015).
- B. Szabó, J. Török, E. Somfai, S. Wegner, R. Stannarius, A. Böse, G. Rose, F. Angenstern, and T. Börzsönyi. *Evolution of shear zones in granular materials*, Phys. Rev. E 90 032205 (2014).
- S. Wegner, R. Stannarius, A. Boese, G. Rose, B. Szabo, E. Somfai, T. Börzsönyi. *Effects of grain shape on packing and dilatancy of sheared granular materials*, Soft Matter, 10 5157 (2014).
- R. Stannarius, S. Wegner, B. Szabo, T. Börzsönyi. *Shear alignment and orientational order of macroscopic rodlike grains*, AIP Conf. Proc. 1542 74 (2013).
- T. Börzsönyi, B. Szabo, S. Wegner, K. Harth, J. Török, E. Somfai, T. Bien, R. Stannarius. *Shear induced alignment and dynamics of elongated granular particles*, Phys. Rev. E 86 051304 (2012).
- S. Wegner, T. Börzsönyi, T. Bien, G. Rose, R. Stannarius. *Alignment and dynamics of elongated cylinders under shear*, Soft Matter 8 10950 (2012).
- T. Börzsönyi, B. Szabo, G. Törös, S. Wegner, J. Török, E. Somfai, T. Bien, R. Stannarius. *Orientalional order and alignment of elongated particles induced by shear*, Phys. Rev. Lett. 108 228302 (2012).
- T. Börzsönyi, T. Unger, B. Szabo, S. Wegner, F. Angenstern, R. Stannarius. *Reflection and exclusion of shear zones in inhomogeneous granular materials*, Soft Matter, 7 8330 - 8336 (2011).

Ehrungen

- 27.10.2012, Jahrgangsbeste Studium Physik Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
- 07/2012, Teilnahme „Lindau Nobel Laureate Meeting 2012“
- 10/2011, Zweiter Posterpreis, 16th Fall Seminar on Nonlinear Dynamics, Bayreuth
- 10/2010, Zweiter Posterpreis, 15th Fall Seminar on Nonlinear Dynamics, Bayreuth

A.7 Lebenslauf

Vor- und Zuname	Sandra Wegner
Geburtsdatum und -ort	29.10.1986, Magdeburg
aktuell - 02/2012	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Bereich: Fakultät für Naturwissenschaften, Institut für Experimentelle Physik, Abteilung Nichtlineare Phänomene (Mutterschutz und Elternzeit: 2016/06-2015/10, 2014/05-2013/09)
04/2013	Forschungsaufenthalt am Research Institute for Solid State Physics and Optics, Budapest, Ungarn (2 Wochen)
09/2012	Forschungsaufenthalt am Research Institute for Solid State Physics and Optics, Budapest, Ungarn (2 Wochen)
05/2012 - 04/2012	Forschungsaufenthalt Kamerlingh Onnes Laboratory, Leiden University, Niederlande (9 Wochen)
12/2011 - 10/2006	Studium Physik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
05/2010	Forschungsaufenthalt am Research Institute for Solid State Physics and Optics, Budapest, Ungarn (3 Wochen)
2006 - 1999	Börde-Gymnasium Wanzleben - Schulabschluss: Abitur
1999 - 1997	Sekundarschule Wanzleben
1997 - 1993	Grundschule Wanzleben

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Dissertation selbständig verfasst, nicht schon als Dissertation verwendet habe und die benutzten Hilfsmittel und Quellen vollständig angegeben wurden.

Weiterhin erkläre ich, dass ich weder diese noch eine andere Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) an anderen Einrichtungen eingereicht habe.

Magdeburg, den 29.08.2016

Danksagung

Für die Unterstützung bei meiner Dissertation möchte ich mich bei folgenden Personen und Institutionen herzlich bedanken:

Bei Prof. Dr. Ralf Stannarius für sehr viel Engagement, gute Ideen und unermüdlichen Einsatz bei der Betreuung meiner Arbeit.

Bei Dr. Tamás Börzsönyi, Dr. Balázs Szabó und David Fischer für fachliche Anregungen und die Unterstützung bei Messungen.

Der Abteilung Nichtlineare Phänomene für das gute Arbeitsklima, nette Kollegen und jegliche Hilfe, ob fachlicher Natur oder der Unterstützung beim Papierkrieg, insbesondere bei Torsten Trittel und Annette Lidzba.

Der Werkstatt und den anderen hier schon genannten Personen für die technischen Umsetzungen der Versuchsaufbauten.

Bei denen, die kleinere Arbeiten, wie Dübel sortieren, für mich übernommen haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für moralische Unterstützung, Aufheiterung, Ablenkung, Frischluftzwang und fachliche Gespräche bedanken. Allen Korrekturlesern meiner Arbeit sei gedankt.