

Ruhr-Universität Bochum, LEAT
Name der Forschungsstelle(n)

15061 / N /
IGF-Vorhaben-Nr. / GAG
01.12.2006 - 30.09.2009
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : 01.12.2006-30.09.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft


ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Bochum, 19.01.2010

Ort, Datum


Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Maschinenbau
- Lehrstuhl für Energieanlagen
und Energieprozesstechnik -
Gebäude 10 3/126
Prof. Dr.-Ing. V. Scherer [A.1.10]
D-44780 Bochum

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Forschungsthema	1
2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
3 Forschungsziel	3
3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	3
3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	4
4 Lösungsweg und Ergebnisse	4
4.1 Zusammenfassung	5
4.2 Veröffentlichungen	7
4.3 Mischungsparameter	8
4.4 Versuchsstand	10
4.4.1 Versuchsdurchführung	11
4.4.2 Bildauswertung	13
4.5 Monodisperse Versuche	14
4.5.1 Einfluss der Stabgeschwindigkeit	14
4.5.2 Einfluss der Hublänge	16
4.5.3 Vergleich der Bewegungsmuster	21
4.5.4 Einfluss des Partikeldurchmessers	23
4.6 Polydisperse Versuche	27
4.7 DEM-Simulation der Experimente	30

4.7.1	DEM-Simulationsmethodik	30
4.7.2	Materialparameter	32
4.7.3	Ergebnisse	34
4.8	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung am Versuchsstand	41
4.9	Rostsimulationen	42
4.9.1	Adhäsionsmodell	43
4.9.2	Rostgeometrien und Randbedingungen	45
4.10	Ergebnisse der Rostsimulationen	48
4.11	Zusammenfassung der Rostsimulationen	57
5	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)	59
5.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse	60
5.2	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kleinen und mittleren Unternehmen (kmU)	61
6	Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse	62
7	Durchführende Forschungsstelle	63
7.1	Leiter der Forschungsstelle	63
7.2	Projektleiter	63
7.3	Bearbeiter des Projektes	63
7.4	Unterschrift	63
8	Literaturverzeichnis	64

1 Forschungsthema

Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Nahezu immer müssen Biomassen vor einer thermischen Nutzung zunächst mechanisch aufbereitet werden, wobei die untere Partikelgröße in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt ist, womit eine Zerkleinerung bis auf Größen, bei denen ein Transport im Flugstrom möglich ist, in der Regel ausscheidet. Unabhängig vom jeweiligen Verfahren erfordern Anlagen zur energetischen Biomassenutzung daher die Handhabung, Lagerung, Aufbereitung und den Transport stückigen Materials entweder in der Funktion eines Rohstoffs, Brennstoffs, Reststoffs oder auch Wärmeträgers. Üblicherweise muss ein solches, im Weiteren zusammenfassend als „granuläres Medium“ bezeichnetes Schüttgut mit Hilfe mechanischer Fördereinrichtungen durch einen oder mehrere Umwandlungsreaktoren transportiert werden.

Die experimentelle Untersuchung des mehrdimensionalen Transports solcher granularer Medien ist nur mit viel Aufwand oder nur unter großen Einschränkungen möglich. Dies gilt in noch viel stärkerem Maße, wenn die Vorgänge zusätzlich mit Wärme- und Stofftransportprozessen oder chemischen Reaktionen (wie z. B. bei Vergasung und Verbrennung) gekoppelt sind. Eine effiziente Alternative zu experimentellen Untersuchungen stellen jedoch auch hier zunehmend numerische Simulationsverfahren dar.

Während die numerische Simulation reagierender Strömungen inzwischen als kostengünstiges und flexibles Werkzeug zur Analyse und Auslegung energieverfahrenstechnischer Anlagen etabliert ([4],[5],[6],[7],[8]) und auch die Simulation reagierender partikelbeladener Fluide Stand der Technik ([9],[10]) ist, bestehen immer dann, wenn die Kontinuumsapproximation für die Partikelphase nicht mehr gültig ist, erhebliche Beschreibungsdefizite. Dies ist vor allem der Fall, wenn bewegte Partikel bzw. Festkörper nicht nur über kurzzeitige Stöße, sondern über längeren mechanischen Kontakt miteinander in Wechselwirkung stehen und zusätzlich Impuls-, Wärme- und Stofftransportvorgänge mit einem die Schüttung durchströmenden Fluid von Bedeutung sind.

Die theoretische Beschreibung thermochemisch aktiver, bewegter Schüttungen und granularer Medien steht heute erst am Anfang [11]. Häufig werden Kontinuumsansätze oder Populationsbilanzen ([6],[12],[13],[14]) zur vereinfachten Beschreibung bewegter Schüttungen benutzt. Wenn jedoch Partikelgröße und andere Randbedingungen dies nicht gestatten, müssen so genannte „Distinct“ bzw. „Discrete Element“ Verfahren (DEM) [15] eingesetzt werden. Nur hierdurch kann die fehlende Information über die Bewegung des stückigen Materials und

die daraus resultierende Vermischung bestimmt werden. Die dabei durchzuführende diskrete Teilchensimulation erlaubt es zudem, vielfältige Einzelprozesse, die im Detail seit langem verstanden und auch fundiert beschreibbar sind, zusammenfassend und im Kontext einer technischen Anlage zu berücksichtigen.

Für diese Aufgabenstellung wurde am Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik (LEAT) in den letzten Jahren ein neues dreidimensionales parallelisiertes DEM-Berechnungsverfahren für große Partikelzahlen und mit komplex bewegten Wänden entwickelt.

Daher waren die Ziele des bearbeiteten Vorhabens

- mit Hilfe dieses Rechenprogramms die mechanisch induzierten Transportvorgänge auf Rostsystemen im Detail zu analysieren und in Abhängigkeit von den äußeren (geometrischen und betrieblichen) Randbedingungen und Materialeigenschaften zu charakterisieren,
- aus diesen Arbeiten kostengünstig zu realisierende experimentelle Konfigurationen abzuleiten, an denen eine gezielte Überprüfung der Berechnungsergebnisse möglich ist,
- um schließlich verschiedene Rostsysteme (sowohl klassische, in der Abfallverbrennung erprobte Rostsysteme als auch die für kleinere Biomasseanlagen typischen Untersubsysteme) zu simulieren, um deren Transport und Mischungsverhalten zu quantifizieren,
- und dadurch letztlich Möglichkeiten zur Verbesserung der Systeme hinsichtlich des verwendbaren Brennstoffbandes, der Emissionen und der Ausbrandgüte durch gezielte Auslegung und Steuerung der Roste zu eröffnen.

Die hieraus resultierenden Erkenntnisse haben auch eine generelle Bedeutung für die numerische Beschreibung des Brennstoffhandlings in Anlagen zur energetischen Biomassenutzung. Eine verbesserte Beschreibungsmöglichkeit der oben angeführten Vorgänge gestattet eine bessere Auslegung von solchen Anlagen und verringert die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risiken. Da es sich, aufgrund des verteilten Brennstoffanfalls meist um vergleichsweise kleine und dezentrale Anlagen handelt, die häufig von KMU's erstellt, gewartet und betrieben werden, ist vor allem im mittelständischen Bereich ein entsprechender Nutzen zu erwarten.

Vor allem bei kleineren Biomassefeuerungen erlangt derzeit auch die Schadstoffemission (insbesondere die Feinstaubemission) immer mehr Beachtung ([3],[16]). Gezielte Primärmaßnahmen zur Kontrolle von PAK-, CO- und Partikelemissionen setzen jedoch eine Kenntnis der Transportvorgänge auf den Verbrennungsrosten voraus.

3 Forschungsziel

3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Das Ziel der Arbeiten ist die numerische und experimentelle Untersuchung der Mischungs- und Transportvorgänge granularer Medien auf unterschiedlichen Rostsystemen, die Aufklärung von deren Wirkungsweise sowie die Untersuchung des Einflusses von Stoff-, Anlagen- und Betriebsparametern. Die theoretischen und ergänzenden experimentellen Untersuchungen schließen eine konkrete Wissenslücke beim Verständnis und bei der Beschreibung von Transportvorgängen auf Rostsystemen. Die Informationen über die unterschiedliche Schürwirkung der verschiedenen in der Anwendung anzutreffenden Systeme als Funktion der Stoffeigenschaften und Betriebsbedingungen können beim LEAT und an anderen Stellen direkt in vorhandene Kontinuumsmodelle zur Beschreibung des Abbrands von Brennstoffschüttungen in Rostfeuerungen einfließen.

Zusammenfassend können als konkrete Forschungsergebnisse erwartet werden:

- Qualitative Analyse der Detailvorgänge und Verständnis der mechanischen Wechselwirkungen in bewegten dreidimensionalen Schüttungen,
- Konkrete quantitative Aussagen zu Mischungs-/bzw. Schürraten, Transportwirkungsgrade, Segregationstiefen, Lückengraden, Partikelverweilzeiten in Rostfeuerungen als Funktion der Rostlänge, die direkt als Information in Kontinuumsmodelle zur Beschreibung reagierender Schüttungen eingehen können oder die als konkrete Auslegungsdaten relevant sind,
- Verallgemeinerte, über die heute vorhandenen Modelle hinaus gehende und insbesondere räumlich aufgelöste Beschreibungsansätze für die genannten Größen,
- Aussagen über die zur Charakterisierung des Transports fester Brennstoffe notwendigen stofflichen Parameter (Körperform, Elastizitätsmodule, Reibungskoeffizienten, ...),
- Ein überprüftes Werkzeug zur Bestimmung der Transportkenngrößen auf Rosten, die als Basis einer feuerungstechnischen Auslegung notwendig sind.

3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Projektes werden erstmals dreidimensionale numerische Analysen zum Mischungs- und Schürungsverhalten granularer Medien auf Verbrennungsrostsystemen durchgeführt. Die Berechnungen werden die zeitabhängige und orts aufgelöste Bewegung der Schüttung und die Misch- und Segregationsvorgänge innerhalb des Brennstoffbetts beschreiben. Neben einem besseren Verständnis der komplexen Detailvorgänge werden hieraus für die Auslegung realer Systeme wichtige Kennzahlen und Parameter ableitbar sein wie z. B. Transportwirkungsgrade und Mischungsgüte. Diese Größen können als Funktion der Betriebsparameter (Geometrie, Schubwege, Vorschubgeschwindigkeiten, Partikelgrößenverteilung) ermittelt werden.

Die am projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Firmen erwarten Hinweise zur Auslegung von Rostsystemen z. B. für die benötigten Rostflächen, Roststabhöhen, für die Gestaltung der Roststäbe und für den Aufbau der Brennstoffzuführung. Diese grundlegenden Hinweise können mit Hilfe des hier verwendeten Instrumentes auch gegeben werden. Das Projekt leistet damit einen konkreten Beitrag zu Verbesserung von Rostsystemen, wie sie vielfach für die Nutzung von Biomasse eingesetzt werden.

Durch die geplante Verifikation der numerischen Ergebnisse anhand von gezielten Experimenten wird ein überprüftes Werkzeug zur Auslegung der Mischung und Schürung auf Rosten zur Verfügung gestellt. Dieses Werkzeug kann sofort dazu dienen, bisher notwendige aufwendige Versuchsreihen planvoll zu optimieren und zu minimieren und schon in der Konstruktionsphase Mischungsparameter in die Planung einzubeziehen.

Neben der Bereitstellung dieser kurzfristig für die praktische Auslegung nützlichen Parameter wird mit dem vorliegenden Projekt die Basis gelegt, vorhandene Kontinuumsrostmodelle zu erweitern und über Kontinuumsansätze hinausgehende Rostmodelle für die Verbrennung von stückigem Material zu entwickeln und damit einen wesentlichen Innovationsschritt bei der Beschreibung und Optimierung von Rostfeuerungen einzuleiten.

4 Lösungsweg und Ergebnisse

Im Bearbeitungszeitraum von Januar 2007 bis Dezember 2007 wurden zunächst Mischungsparameter definiert. Anhand von ersten DEM-Simulationen zu drei verschiedenen Rostkonfigurationen wurde die Aussagekraft, Stärken und Schwächen dieser Parameter getestet und anhand dessen modifiziert. Die ersten Rostsimulationen wurden auch dafür verwendet einen an Schubroste angelehnten, aber auf die grundlegenden mechanischen Aspekte reduzierten Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung der Schürung und Mischung in einer be-

wegten Schüttung zu konzipieren. Vor dem Bau des Versuchsstandes wurden zur Überprüfung der Funktionalität mehrere DEM-Simulationen verschiedener Bewegungsmuster durchgeführt und miteinander verglichen.

Im Bearbeitungszeitraum von Januar 2008 bis Dezember 2008 wurde der Versuchsstand fertig gestellt und für eine monodisperse Schüttung aus Kugeln mit einem Durchmesser von 10 mm der Einfluss der Stabgeschwindigkeit, der Hublänge sowie des Bewegungsmusters auf die Mischung untersucht. Des Weiteren wurden entsprechende DEM-Simulationen durchgeführt und mit den Experimenten verglichen.

Im letzten Bearbeitungszeitraum von Januar 2009 bis September 2009 wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen mit monodispersen Schüttungen aus 5 mm bzw. 20 mm Kugeln, einer polydispersen Schüttung aus 5, 10 und 20 mm Kugeln und entsprechende DEM-Simulationen durchgeführt und untereinander bzw. miteinander verglichen. Weiterhin wurden DEM-Simulationen zu realen Rostsystemen eines Vorschub-, eines Rückschub- und eines Walzenrostes durchgeführt, Transport- und Mischungsverhalten analysiert und verglichen.

Im Folgenden erfolgt eine kurze Zusammenfassung der insgesamt erzielten Ergebnisse und eine Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden bzw. in Kürze veröffentlicht werden. Da die Mischungsparameter die Basis für die Auswertung der Experimente als auch der Simulationen darstellen, werden sie im Abschnitt 4.3 kurz erläutert. Der Versuchsstand, die Versuchsdurchführung, die untersuchten Bewegungsmuster sowie die Funktionsweise der entwickelten Bildauswertung werden in Abschnitt 4.4 dargestellt. Anschließend erfolgt die Erläuterung der experimentellen Ergebnisse der mono- und polydispersen Versuche sowie der dazugehörigen DEM-Simulationen. Die Geometrien der drei Rostsysteme und die Randbedingungen der Simulationen werden in Abschnitt 4.9 und die Ergebnisse in Abschnitt 4.10 aufgezeigt.

4.1 Zusammenfassung

Die durchgeführten Forschungsarbeiten lassen sich im Wesentlichen in zwei Hauptbereiche, zum einen die experimentelle und zum anderen die numerische Untersuchung der Schürung und Mischung granularer Medien, unterteilen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden dabei an einem an industrielle Schubroste angelehnten Versuchsstand durchgeführt und haben mehrere für die Praxis relevante Erkenntnisse hervorgebracht. Es hat sich gezeigt, dass durch die Erhöhung der Roststabgeschwindigkeit zwar der Massendurchsatz gesteigert wird, aber kein starker Einfluss auf die Mischung und Schürung zu erwarten ist. Im Gegensatz dazu wird durch die Steigerung des Verfahrensweges der

Roststäbe (die Hublänge) mehr Mischung innerhalb der Schüttung erzeugt. Des Weiteren ist bei Schubrosten das Gegenhubprinzip dem Gleichhubprinzip bezüglich einer besseren Vermischung des Brennstoffbetts vorzuziehen, da sich bei den durchgeführten Versuchen herausgestellt hat, dass mehr Mischung induziert wird wenn mehr Abstand zwischen zwei gleich bewegten Stäben vorliegt. Hinsichtlich des Einflusses des Korndurchmessers auf die Mischung zeigte sich, dass mit steigendem Verhältnis von Durchmesser zu Stabbreite die Mischung zunimmt.

Ein Großteil der durchgeführten Experimente diente zur gezielten Überprüfung einzelner Unsicherheiten in der Modellbildung der Diskrete Elemente Methode. Sowohl die aufgestellten Mischungsparameter als auch der rein visuelle Vergleich der DEM-Simulation mit den Experimenten hat eine sehr gute Übereinstimmung gezeigt. Selbst vergleichsweise großräumige Phänomene lassen sich in gleicher Form wie im Experiment auch in der DEM-Simulation beobachten. Im Hinblick auf die Simulation realer komplexerer Systeme ist allerdings zu erwarten, dass die Simulation das tatsächliche Verhalten nur eingeschränkt wiedergeben kann, wenn die Randbedingungen (Partikel unterschiedlicher Formen, Größen, Materialien etc.) zu stark abweichen. Eine qualitative Aussage über die Mischung in Schüttgütern lässt sich mit dem vorhandenen DEM-Simulationsprogramm auch bei komplexeren Systemen treffen. Die Simulationen und Untersuchungen der drei verschiedenen Rosttypen haben Ergebnisse geliefert, die auch für die industrielle Anwendung relevant sind. Es hat sich gezeigt, dass der Vorschubrost die Schüttung gleichmäßiger fördert als der Rückschubrost. Dabei halten sich Partikel aus ursprünglich unteren Schichten länger auf dem Rost auf, als Partikel, die sich zu Beginn in oberen Schichten befinden. Beim Rückschubrost entsteht eine Scherzone im unteren Bereich der Schüttung innerhalb derer sich die Partikel nur sehr langsam in Laufrichtung bewegen. Die darüberliegenden Partikelschichten dagegen werden ebenfalls relativ kontinuierlich gefördert. Für den Walzenrost zeigte sich, dass die unteren Schichten der Schüttung nur sehr langsam transportiert werden. Bezüglich der Verweilzeit verschiedener Partikelgrößenklassen hat sich eindeutig herausgestellt, dass die Größe eines Partikels nur geringen Einfluss auf seine Verweilzeit auf dem Rost hat. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Größensegregation wegen des mechanischen Verhakens der Partikel, kein dominierender Effekt zu sein scheint, wobei der Segregationseffekt auf dem Vorschubrost größer ist als auf dem Rückschubrost.

Hinsichtlich der Mischungsvorgänge auf den Rostsystemen wurde festgestellt, dass die Mischung relativ spät sichtbare Auswirkungen zeigt. Anschließend mischt der Vorschubrost überwiegend kleine lokal begrenzte Bereiche, wohingegen der Rückschubrost größere Bereiche als Ganzes umschichtet.

Mit Hilfe des eingeführten Transportwirkungsgrades hat sich bei den hier betrachteten Systemen herausgestellt, dass der Transport auf dem Rückschubrost wesentlich effektiver ist als auf dem Vorschubrost.

Alle hier gezogenen Schlussfolgerungen, unterliegen der Einschränkung, dass eine vereinfachte Rostgeometrie sowie stark abstrahierte Partikelgeometrien verwendet wurden. Durch Sekundäreffekte, die durch die Verbrennung entstehen (z. B. Erweichen von Partikeln und anschließendes „Kleben“) konnten in den Untersuchungen nur vereinfacht abgebildet werden.

Das Ziel des durch das BMWA über die AiF geförderten Vorhabens durch numerische und experimentelle Untersuchungen der Mischungs- und Transportvorgänge granularer Medien deren Wirkungsweise sowie den Einfluss verschiedener Parameter aufzuklären, wurde somit erreicht.

4.2 Veröffentlichungen

Sudbrock, F.; Simsek, E.; Wirtz, S.; Scherer, V.: An experimental analysis on mixing and stoking of monodisperse spheres on a grate, Powder Technology (2009), doi:10.1016/j.powtec.2009.10.011

Simsek, E.; Sudbrock, F.; Wirtz, S.; Scherer, V.: Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen von Müll- und Biomasseanlagen, VGB PowerTech Volume 9/2009 S. 114-120, September 2009

Brosch, B.; Simsek, E.; Wirtz, S.; Scherer, V.: Numerische Beschreibung von reaktiven Schüttungen mittels einer Euler-/ Lagrangemethode am Beispiel einer Unterschubfeuerung, 24. Deutscher Flammentag, Bochum, 16.-17. September 2009

Simsek, E., Brosch, B., Wirtz, S., Scherer, V.: Numerical Simulation of Grate Firing Systems using a Coupled CFD / Discrete Element Method (DEM), Powder Technology 193 (2009) pp. 266-273

Simsek, E.; Brosch, B.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Krüll, F.: Numerical Simulation of Solid Fuel Conversion on a Forward Acting Grate with a Coupled CFD / Discrete Element Method (DEM), INFUB-8th European Conference on Industrial Burners and Furnaces, Vilamoura, Portugal, 25.-28. März 2008

Simsek, E.; Brosch, B.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Krüll, F.: Numerische Simulation von Müllrostfeuerungen mittels Diskreter Elemente Methode (DEM), 23. Deutscher Flammentag, 12.-13. September 2007, Berlin, 2007

Simsek, E.; Brosch, B.; Wirtz, S.; Scherer, V.; Krüll, F.: Numerical simulation of heat transfer and chemical reaction on grates using a coupled CFD / Discrete Element Method, DEM07 Conference, 27.-29. August 2007, Brisbane, 2007

4.3 Mischungsparameter

Um den Grad der Mischung innerhalb einer bewegten Schüttung im zeitlichen Verlauf zu bestimmen, werden zwei Methoden benutzt. Die erste Methode basiert auf einer Ermittlung der Abweichung bzw. Varianz der Zusammensetzung vieler lokaler Stichproben von der globalen Zusammensetzung [23]:

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{m-1} \sum_{v=1}^m \sum_{u=1}^k \bar{c}_u (c_{u,v}(t) - \bar{c}_u)^2 \quad (4.1)$$

Dabei entspricht k der Anzahl der Komponenten, m der Anzahl der lokalen Stichproben, $c_{u,v}(t)$ dem Anteil der Komponente u in der Probe v und \bar{c}_u dem globalen Anteil der Komponente u . Daraus kann der „Mischungsindex“ $M_\sigma(t)$ abgeleitet werden, der die Varianz $\sigma^2(t)$ ins Verhältnis zur Varianz für eine komplett ungemischte Schüttung σ_0^2 setzt:

$$M_\sigma(t) = 1 - \frac{\sigma^2(t)}{\sigma_0^2} \quad (4.2)$$

Ein komplett ungemischter Zustand ist dadurch charakterisiert, dass jede Probe nur genau eine Komponente enthält, sodass sich die Gleichung (4.1) zu folgendem Ausdruck vereinfachen lässt [23]:

$$\sigma_0^2 = \sum_{u=1}^k \bar{c}_u^2 (1 - \bar{c}_u) \quad (4.3)$$

Der Mischungsindex $M_\sigma(t)$ nimmt aufgrund dieser Vorgehensweise Werte zwischen 0 (komplett ungemischt) und 1 (ideal gemischt) an.

Die zweite Methode basiert auf der relativen Position der Partikel innerhalb der Schüttung. Sie kann dabei bezogen auf Breite (x-Achse), Tiefe (y-Achse) und Höhe (z-Achse) der Schüttung analysiert werden (Gleichung (4.4)).

$$P_{x,i}(t) = \frac{r_{x,i}(t) - (x_{\min,i}(t) + R_i)}{(x_{\max,i}(t) - x_{\min,i}(t)) - 2R_i}; \quad P_{y,i}(t) = \frac{r_{y,i}(t) - (y_{\min,i}(t) + R_i)}{(y_{\max,i}(t) - y_{\min,i}(t)) - 2R_i} \quad (4.4)$$

$$P_{z,i}(t) = \frac{r_{z,i}(t) - (z_{\min,i}(t) + R_i)}{(z_{\max,i}(t) - z_{\min,i}(t)) - 2R_i}; \quad \begin{aligned} z_{\min,i}(t) &= \min(r_{z,j}(t) - R_j) \\ z_{\max,i}(t) &= \max(r_{z,j}(t) + R_j) \end{aligned}$$

Dabei sind $r_{x,i}$, $r_{y,i}$ und $r_{z,i}$ die Koordinaten und R_i der Radius des Partikels i . Für die Höhe bedeutet dies, dass alle Partikel, die sich ganz unten in der Schüttung befinden, eine relative Position von 0 in diese Richtung haben und alle Partikel, die sich ganz oben befinden, entsprechend eine relative Position von 1 besitzen (Abbildung 4.1). Für die Breite und die Tiefe ist dies analog übertragbar.

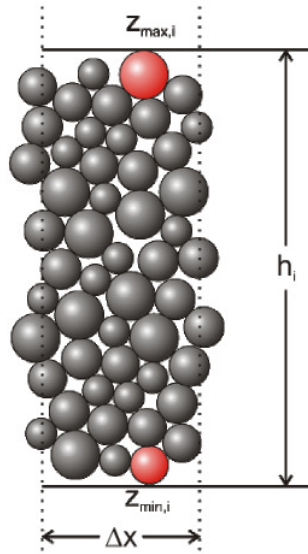


Abbildung 4.1: Bestimmung von $z_{\min,i}$ und $z_{\max,i}$ eines Ausschnittes aus dem Schüttgut

Betrachtet man zu einem bestimmten Zeitpunkt die Abweichung der relativen Position einer Partikelklasse $P_u(t)$ zur mittleren relativen Position aller Partikel $\bar{P}(t)$ (Gleichung (4.5)), lässt sich der „Segregationsindex“ $\vartheta(t)$ (Gleichung (4.6)) ableiten [24]. Wobei die Klasseneinteilung anhand beliebiger Charakteristiken der Partikel (Durchmesser, Farbe, Dichte, Form usw.) definiert werden kann.

$$P_u(t) = \frac{\sum_{i=1}^p \delta_i^u P_i(t)}{\sum_{i=1}^p \delta_i^u}, \quad \delta_i^u = \begin{cases} 1 & \text{if } i \in u \\ 0 & \text{if } i \notin u \end{cases}, \quad \bar{P}(t) = \frac{\sum_{i=1}^p P_i(t)}{p} \quad (4.5)$$

$$\vartheta(t) = \sqrt{\sum_{u=1}^k \bar{c}_u (P_u(t) - \bar{P}(t))^2} \quad (4.6)$$

Dieser Mischungsparameter nimmt für eine ideal gemischte oder nicht segregierte Schüttung den Wert 0 an, da alle Klassen gleichverteilt in der Schüttung vorliegen und somit die relativen Positionen der einzelnen Klassen der mittleren relativen Position aller Partikel entsprechen. Für eine ungemischte oder segregierte Schüttung nimmt der Segregationsindex entsprechend größere Werte an.

Zusätzlich wurde eine „Mischungseffizienz“ ε (Gleichung (4.7)) eingeführt, die den Nutzen zum mechanischen Aufwand ins Verhältnis setzt. Der Nutzen ΔM_σ entspricht der Verbesserung des Mischungszustandes, d. h. der Differenz zwischen dem Anfangs- $M_\sigma(t_i)$ und dem Endwert $M_\sigma(t_e)$ des Mischungsindex. Der mechanische Aufwand reduziert sich bei einem Schubsystem von Stäben auf das Produkt aus der Anzahl der bewegten Stäbe $n_{BS\sigma}$, der Anzahl der durchgeführten Hübe n_{Hub} und der Hublänge s_{Hub} .

$$\varepsilon = \frac{\Delta M_\sigma}{n_{BS\sigma} \cdot n_{Hub} \cdot s_{Hub}}; \Delta M_\sigma = M_\sigma(t_i) - M_\sigma(t_f) \quad (4.7)$$

Die Mischungseffizienz ermöglicht den Vergleich verschiedener Bewegungsmuster und die Bewertung des Einflusses der Hublänge und der Stabgeschwindigkeit mit nur einem Wert.

4.4 Versuchsstand

Der Versuchsstand ist in Anlehnung an industrielle Schubroste konstruiert worden, dabei wurde darauf geachtet, dass bei einer verhältnismäßig einfachen Versuchsanordnung die grundlegenden mechanischen Aspekte wiedergegeben werden. Aus diesem Grund wurde auf ein geneigtes Input-Output System verzichtet. In Abbildung 4.1 sind eine Prinzipskizze sowie ein Foto des Versuchstandes gezeigt. Er besteht aus 15 vertikal angeordneten beweglichen Stäben, die die darüberliegende Schüttung mechanisch mischen. Jeder Stab hat eine Länge und Höhe von 300 mm und eine Breite von 20 mm. Die Lücken zwischen den Stäben betragen 1,25 mm, sodass der Querschnitt des Versuchstandes sich zu 320x300 mm ergibt. An der Unterseite sind die Stäbe über eine Gewindestange mit jeweils einem Schrittmotor verbunden, die mit einer Steuerung angesteuert werden können. Durch diese individuelle Steuerung der Stabbewegung ist es möglich, eine große Vielfalt an Bewegungsmustern, Hublängen und Stabgeschwindigkeiten zu realisieren. Zur Aufzeichnung der Partikelbewegung im Versuch dienten zwei Videokameras (siehe 4.4.2). Die Hauptkamera wird in einem Abstand von ca. 2 m mittig vor dem Versuchsstand aufgestellt. Zwei Scheinwerfer zur linken und rechten Seite der Kamera sorgen dabei für eine optimale Ausleuchtung. Um Reflexionen zu vermeiden

und einen stärkeren Kontrast zwischen Kugeln und Hintergrund zu erzeugen, wurden die Rückwand und die Seitenwände während eines Versuches mit schwarzem Stoff abgedunkelt. Für eine möglichst umfassende Aufnahme des Schüttguts, wurde zusätzlich zu der frontal positionierten Kamera eine zweite über den Versuchsstand angebracht, die den Versuch von oben gefilmt hat.

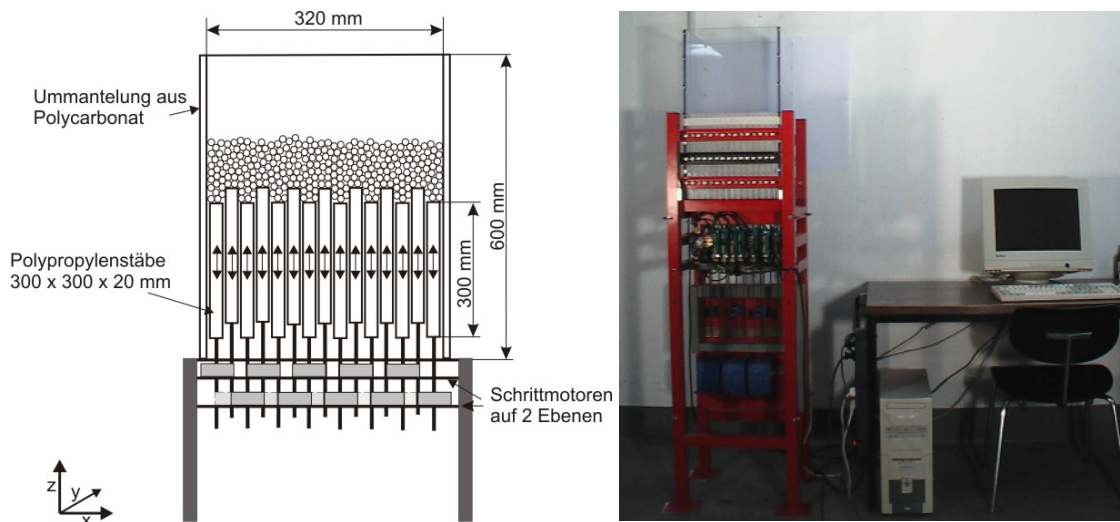


Abbildung 4.2: Versuchsstand zur Untersuchung der Mischung

Das verwendete Schüttgut besteht aus Polyoxymethyl (POM)-Kugeln mit Durchmessern von $5\pm 0,1$, $10\pm 0,1$, und $20\pm 0,1$ mm. Wobei die Kugeln der 5 mm Klasse in den Farben grün und gelb, der 10 mm Klasse in den Farben rot, grün, blau und gelb und der 20 mm Klasse in den Farben rot und blau vorliegen.

4.4.1 Versuchsdurchführung

Alle Versuche starten mit der gleichen Partikelanordnung (Abbildung 4.3), bei der die Stäbe auf einer Höhe horizontal positioniert und die Partikel in Schichten übereinander angeordnet werden. In allen Versuchen wird dabei eine einheitliche Schütthöhe von 10 cm eingestellt. Daraus resultiert eine Kugelanzahl von 108.000 Partikeln bei den 5 mm Versuchen, 10.800 Partikeln bei den 10 mm Versuchen und 1.480 Partikeln bei den 20 mm Versuchen, wobei jede Farbe in gleichen Anteilen eingefüllt wird. Bei den polydispersen Versuchen entspricht die Gesamtanzahl der Partikel 42.000 mit 37.300 kleinen, 4.200 mittleren und 500 großen Kugeln.

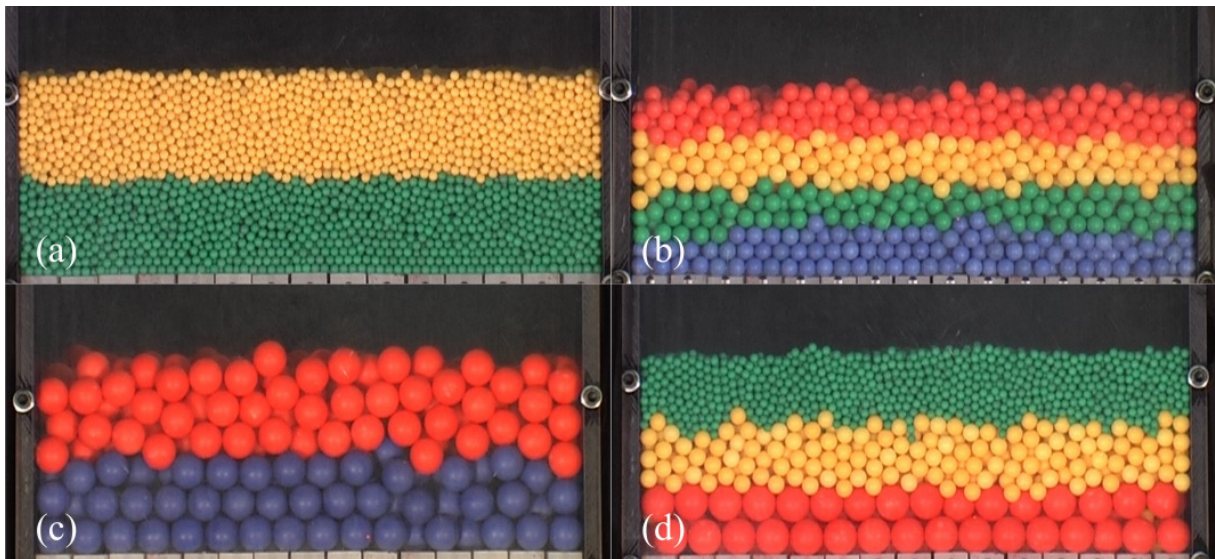


Abbildung 4.3: Initialzustand der monodispersen 5 mm (a), 10 mm (b) und 20 mm (c) Versuche und der polydispersen Versuche (d)

Ausgehend von diesem höchsten Zustand der Segregation führen die Stäbe acht Hübe aus und kehren zu ihrer Initialenposition zurück. Um den Einfluss der Stabgeschwindigkeit und Hublänge auf die Mischung zu untersuchen, werden Versuche mit Stabgeschwindigkeiten von 3, 6, 10 und 35 mm/s und Hublängen von 5, 7, 10 und 14 cm gefahren, wobei immer nur ein Parameter variiert wird.

Wie bereits angesprochen, ermöglicht der Versuchstand neben der Variation der Stabgeschwindigkeiten und Hublängen auch eine breite Variation der Bewegungsmuster der Stäbe. Untersucht wurden die in Abbildung 4.4 dargestellten fünf Bewegungsmuster. Die Nummerierung der Stäbe ist eine Kennzeichnung der Abfolge der Stabbewegung. Im Zweigruppen-Modus (Abbildung 4.4 (a)) bewegen sich die Stäbe alternierend in zwei Gruppen, wobei die zweite Gruppe startet, wenn die Erste ihre maximale Position erreicht hat. Im Dreigruppen-Modus (Abbildung 4.4 (b)) sind die Stäbe in drei Gruppen eingeteilt mit einem zeitlichen Versatz von einem halben Hub zwischen Gruppe 1 und 2 und Gruppe 2 und 3. Im Wellen-Modus (Abbildung 4.4 (c)) starten die Stäbe beginnend von links und rechts mit einem zeitlichen Versatz von einem halben Hub und bilden dadurch zwei Wellen symmetrisch zur Mitte. Bei den letzten beiden Modi ist, in Anlehnung an industrielle Schubroste, jede zweite Stabreihe unbewegt (Stäbe ohne Nummer). Im Gleichhub-Modus (Abbildung 4.4 (d)) führen die bewegten Stäbe eine gleichförmige auf und ab Bewegung aus. Im Gegenhub-Modus (Abbildung 4.4 (e)) dagegen sind die bewegten Stäbe in zwei Gruppen unterteilt, die sich entgegengesetzt bewegen.

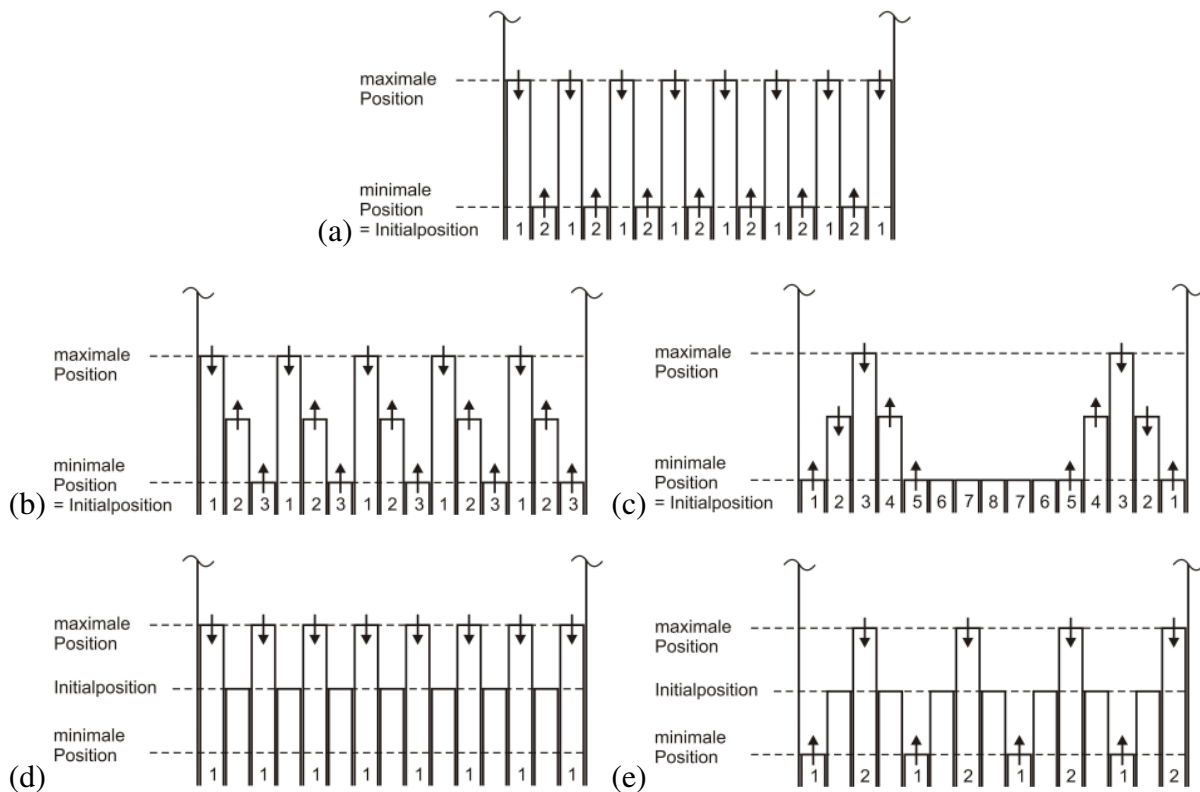


Abbildung 4.4: Bewegungsmuster: (a) „Zweigruppen-Modus“; (b) „Dreigruppen-Modus“; (c) „Wellen-Modus“; (d) „Gleichhub-Modus“; (e) „Gegenhub-Modus“

4.4.2 Bildauswertung

Der Mischungsprozess wird mit einer Panasonic NV-GS230 3CCD Digital Kamera mit einer Auflösung von 720 zu 576 Pixeln und einer Bildrate 25 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Anschließend werden die entsprechenden Videos für die Bildanalyse in eine Serie von Einzelbildern transferiert. Anhand dieser Einzelbilder wird auf Basis der frei zugänglichen Bibliothek VIGRA zur Bildanalyse [25] mit einem selbst entwickelten Bildauswertungsprogramm die Position und die Farbe jedes sichtbaren Partikels ermittelt. Dabei werden im ersten Schritt die Kanten der Partikel mit dem Canny-Algorithmus [26] extrahiert (Abbildung 4.5 (b)) und mit der darauf folgenden Hough-Transformation [27] werden daraus die Positionen der Partikel innerhalb der Schüttung bestimmt (Abbildung 4.5 (c)). Im zweiten Schritt werden die fehlenden Partikel mit einem Algorithmus detektiert, der kreisförmige Anhäufungen von Pixeln mit gleicher Farbe sucht (Abbildung 4.5 (d)). Der Vergleich der Originalbilder mit den Ergebnissen der Bildauswertung zeigt, dass zwischen 95 und 99 % der sichtbaren Partikel detektiert werden.

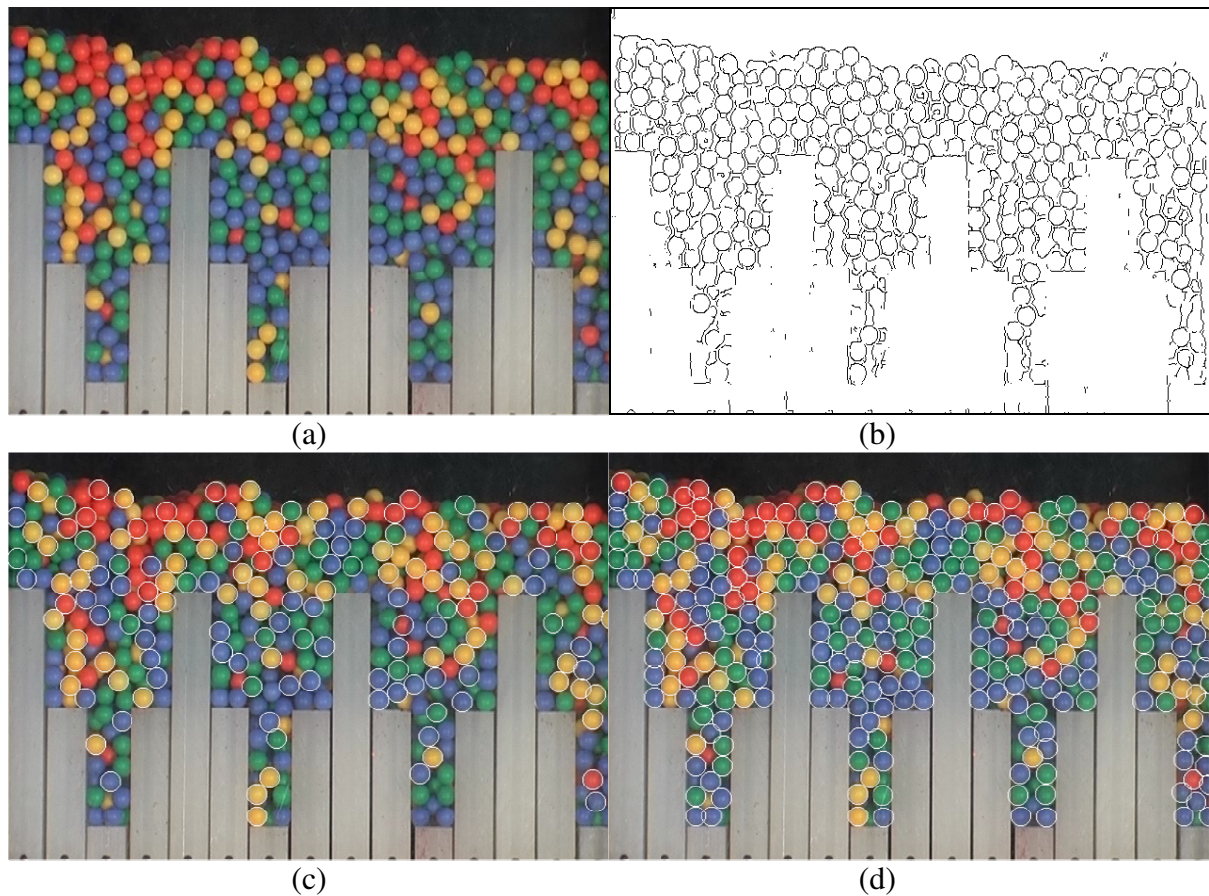


Abbildung 4.5: (a) Originalbild; (b) Kantenextraktion; (c) Detektierte Kugeln anhand der Kanten; (d) Detektierte Kugeln nach zusätzlicher Suche gleichfarbiger Pixel

4.5 Monodisperse Versuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der monodispersen Versuche mit den 5, 10 und 20 mm Kugeln anhand der visuellen Erscheinung, des Mischungsindex M_σ , des Segregationsindex ϑ , der Verbesserung des Mischungszustandes ΔM_σ und der Mischungseffizienz ε analysiert. Dabei ist zu erwähnen, dass diese Ergebnisse sich auf die Vorgänge an der Frontwand beziehen.

4.5.1 Einfluss der Stabgeschwindigkeit

Der Einfluss der Stabgeschwindigkeit wurde zunächst am Dreigruppen-Modus bei konstanter Hublänge von 10 cm und mit 10 mm Kugeln untersucht. Um die Schwankung der Ergebnisse durch die Versuchsdurchführung abschätzen zu können, wurde zusätzlich der Versuch mit 10 cm Hublänge und einer Stabgeschwindigkeit von 10 mm/s dreimal wiederholt. Die folgende Abbildung 4.6 zeigt die Endverteilung der Partikel nach acht Hüben für die drei Versuche

mit gleichen Randbedingungen (Abbildung 4.6 (a, b, c)) und die Versuche mit 3 mm/s (d), 6 mm/s (e) und 35 mm/s (f) Stabgeschwindigkeit.

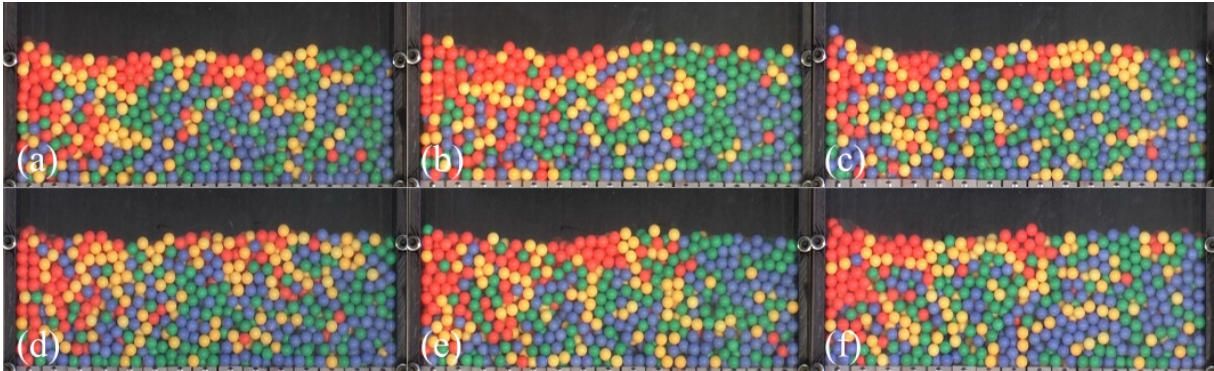


Abbildung 4.6: Endverteilung mit 10 cm Hublänge und 10 mm Kugeln:

(a) erster Versuch mit 10 mm/s; (b) zweiter mit 10 mm/s; (c) dritter mit 10 mm/s; (d) mit 3 mm/s; (e) mit 6 mm/s; (f) mit 35 mm/s

Die Endverteilungen der drei Versuche mit gleichen Randbedingungen als auch die drei Versuche mit variiert Stabgeschwindigkeit sind sehr ähnlich. Alle Verteilungen zeigen eine Rotation der Schüttung entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn. Die roten Kugeln, zu Beginn in der oberen Schicht, haben sich überwiegend zur linken Seite bewegt, wobei die blauen Kugeln, zu Beginn in der untersten Schicht, nach rechts gewandert sind. Rein visuell lässt sich bei den Endverteilungen dieser Versuche kein signifikanter Einfluss der Stabgeschwindigkeit feststellen.

Die Mischungsparameter (Abbildung 4.7) bestätigen diesen visuellen Eindruck.

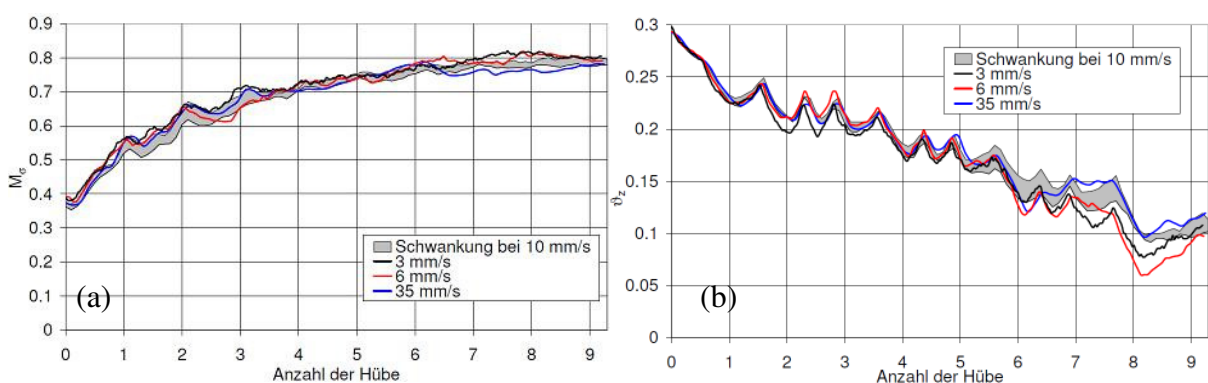


Abbildung 4.7: Einfluss der Stabgeschwindigkeit: (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex

Beide Parameter zeigen, dass die Werte der Experimente mit Variation der Stabgeschwindigkeit innerhalb des Schwankungsbereiches der Versuchsdurchführung liegen. Der Schwankungsbereich wurde dabei aus den drei Versuchen mit identischen Randbedingungen ermit-

telt. Es lässt sich auch bei der Betrachtung der Mischungsparameter sagen, dass die Stabgeschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf den Mischungsprozess hat. Diese Erkenntnis wurde sowohl durch eine weitere Versuchsreihe mit dem Gegenhub-Modus mit 10 mm Kugeln als auch durch jeweils zwei monodisperse Versuchsreihen mit 5 und 20 mm Kugeln und durch zwei polydisperse Versuchsreihen bestätigt. Von daher wird auf den Einfluss der Stabgeschwindigkeit im Weiteren nicht mehr eingegangen. Alle im Folgenden gezeigten Versuche wurden mit einer konstanten Stabgeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt.

Generell zeigen die Mischungsparameter, wie zu erwarten, mit jedem durchgeführten Hub eine bessere Mischung. Wobei dies bei dem Mischungsindex durch einen Anstieg und bei dem Segregationsindex durch den Abfall verdeutlicht wird.

4.5.2 Einfluss der Hublänge

Der Einfluss der Hublänge wurde an allen Bewegungsmustern bei einer konstanten Stabgeschwindigkeit von 10 mm/s mit 10 und 20 mm Kugeln untersucht. Da der Sortieraufwand bei den 5 mm Kugeln (108.000 Kugeln pro Versuch) sehr groß ist, konnten mit diesem Kugeldurchmesser nur der Dreigruppen- und der Gegenhub-Modus analysiert werden.

Im Zweigruppen-, Dreigruppen- und Wellen-Modus wurden Hublängen von 5, 7 und 10 cm betrachtet, was bei diesen Bewegungsmustern gleichbedeutend mit der Eindringtiefe in die Schüttung ist. Da sich die Stäbe beim Gleichhub- und beim Gegenhub-Modus alternierend um die Initialposition bewegen (Abbildung 4.4 (d, e)), ist die Eindringtiefe hier nur die Hälfte der Hublänge. Aus diesem Grund wurden bei diesen Modi Hublängen von 10 cm (=5 cm Eindringtiefe) und 14 cm (=7 cm Eindringtiefe) untersucht. Eine Hublänge von 20 cm (=10 cm Eindringtiefe) für den Vergleich mit den ersten drei Modi konnte aufgrund von Beschränkungen des Versuchstandes nicht realisiert werden. Stattdessen wurde als dritte Variation eine Hublänge von 7 cm (=Eindringtiefe 3,5 cm) gewählt.

In der Abbildung 4.8 sind die Endverteilungen der Partikel nach acht Hüben für die Versuche mit Hublängenvariation und 10 mm Kugeln abgebildet. Jede Zeile entspricht den Ergebnissen eines Bewegungsmusters, wobei die Hublänge von links nach rechts zunimmt.

Die Endverteilungen zeigen einen deutlichen Einfluss der Hublänge auf die Mischung. Die stärkste Vermischung wird in jedem Modus mit der höchsten Hublänge erreicht (Abbildung 4.8 (c, f, i, l, o)). Der Gleichhub-Modus (Abbildung 4.8 (j, k, l)) zeigt im Vergleich mit den anderen Modi ganz deutlich die schwächste Vermischung insbesondere bei der höchsten Hublänge. Es ist auch zu sehen, dass bei allen Modi die Anzahl der gelben und vor allem der roten Kugeln mit zunehmender Vermischung abnimmt und die Anzahl der grünen und blauen Ku-

geln dementsprechend zunimmt. Dieser Effekt wird dadurch verursacht, dass die Kugeln der unteren Schichten (grün und blau) an den Wänden heraufwandern und die Kugeln der oberen Schichten (gelb und rot) verdrängen. Andere makroskopische Effekte sind die bereits erwähnte Rotation der gesamten Schüttung entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn im Dreigruppen-Modus (Abbildung 4.8 (d, e, f)) und die symmetrische Anordnung der Kugeln zur Mittellinie im Wellen-Modus (Abbildung 4.8 (g, h, i)).

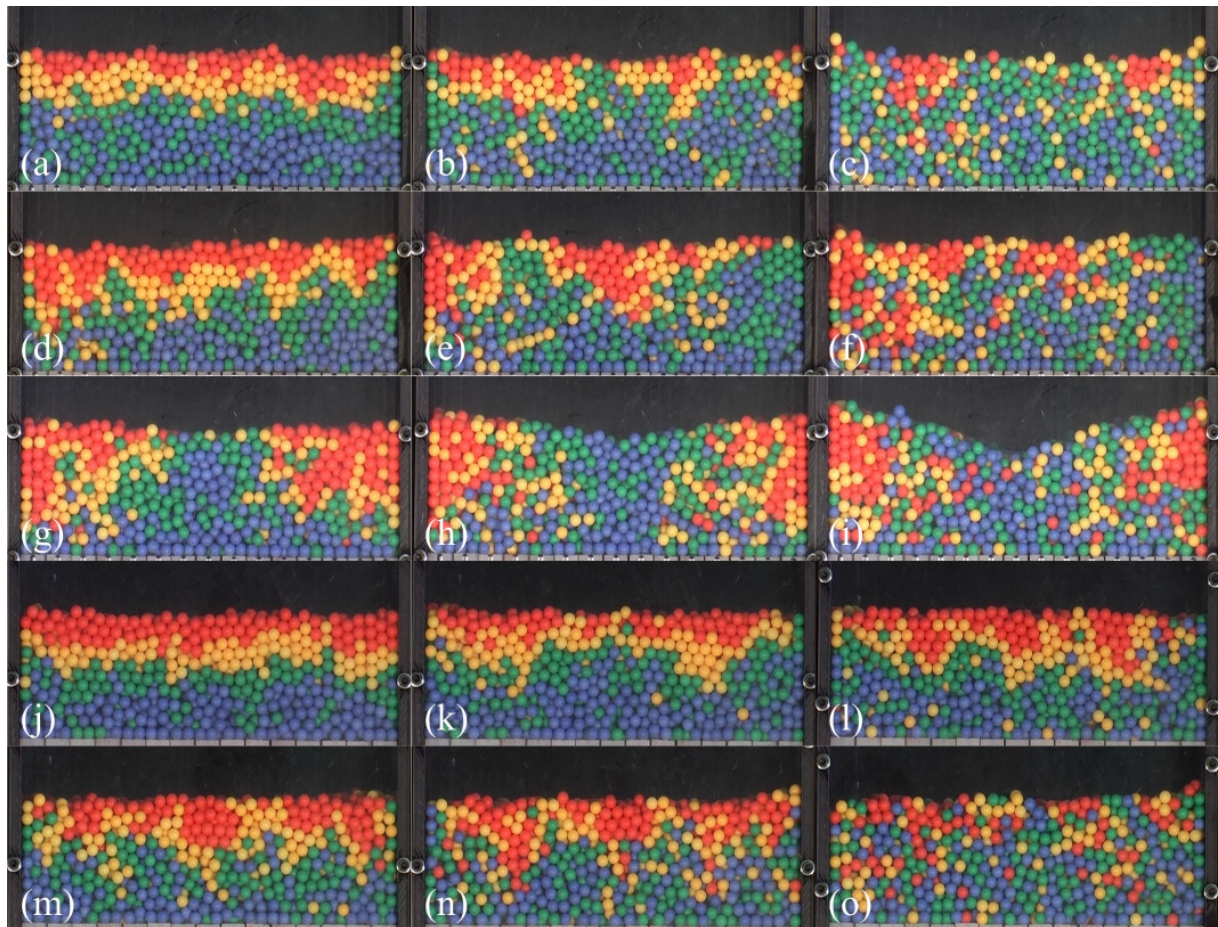
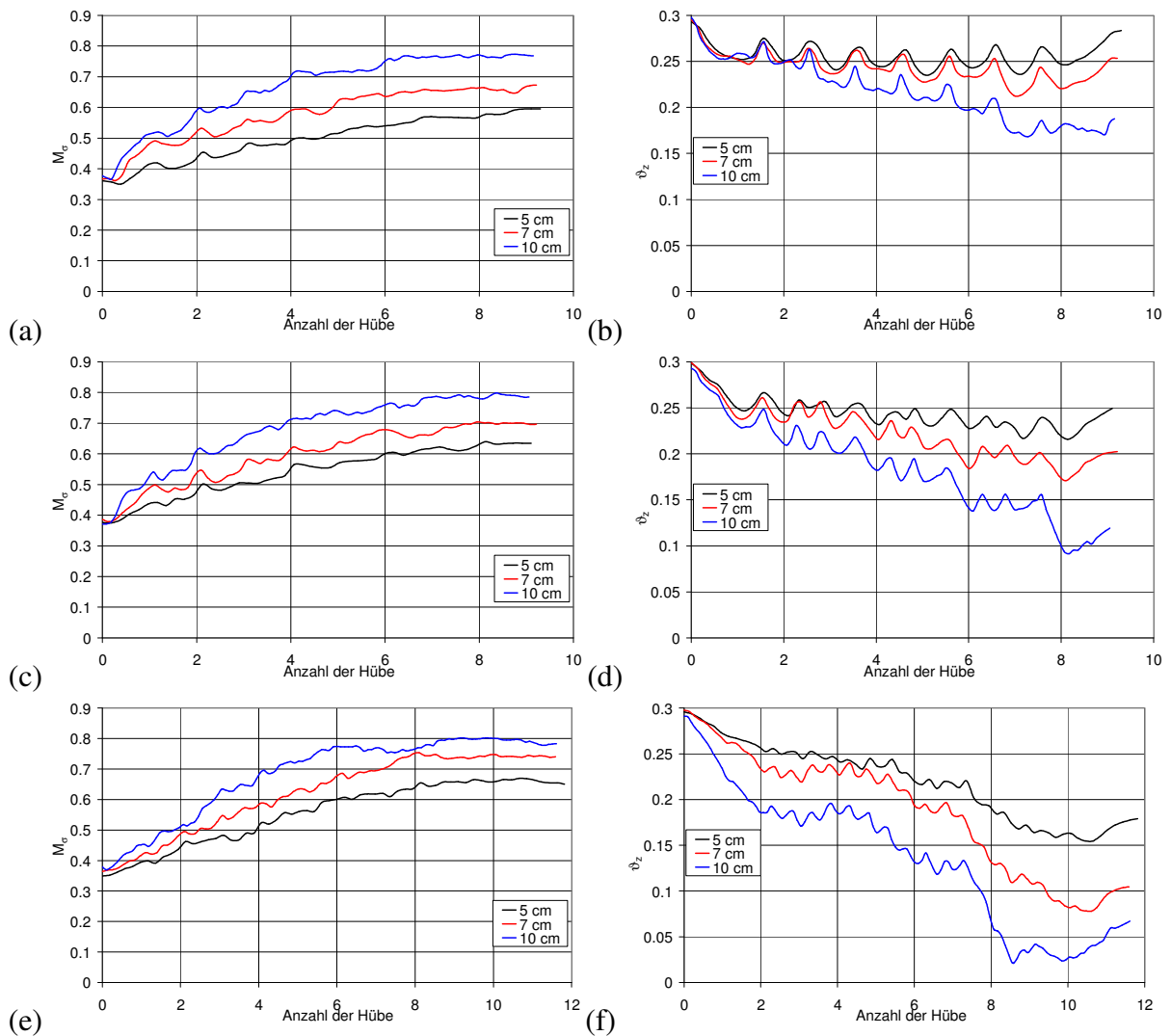


Abbildung 4.8: Endverteilung mit 10 mm Kugeln:

Zweigruppen-Modus mit	(a) 5 cm, (b) 7 cm und (c) 10 cm Hublänge
Dreigruppen-Modus mit	(d) 5 cm, (e) 7 cm und (f) 10 cm Hublänge
Wellen-Modus mit	(g) 5 cm, (h) 7 cm und (i) 10 cm Hublänge
Gleichhub-Modus mit	(j) 7 cm, (k) 10 cm und (l) 14 cm Hublänge
Gegenhub-Modus mit	(m) 7 cm, (n) 10 cm und (p) 14 cm Hublänge

Auch bei diesen Versuchen bestätigen die Mischungsparameter (Abbildung 4.9) die aus den Endverteilungen gewonnen visuellen Eindrücke. Bei allen Bewegungsmustern wird eine deutliche Zunahme der Vermischung mit zunehmender Hublänge angezeigt. Visuell wurde der Gleichhub-Modus als das am schlechtesten mischende Bewegungsmuster identifiziert, dies ist

ebenfalls aus den Mischungsparametern ersichtlich. Der Mischungsindex erreicht bei diesem Modus nur einen Maximalwert von 0,8 (Abbildung 4.9 (g)) und der Segregationsindex nur einen Minimalwert von 0,2 (Abbildung 4.9 (h)). Wohingegen die anderen Modi beim Mischungsindex bei Werten von 0,9 und größer (Abbildung 4.9 (a, c, e, i)) und beim Segregationsindex bei Werten von 0,15 und kleiner (Abbildung 4.9 (b, d, f, j)) enden. Insgesamt zeigen der Wellen- und der Gegenhub-Modus die beste und der Zweigruppen- und der Gleichhub-Modus die schwächste Vermischung der Schüttung. Der Dreigruppen-Modus ist dazwischen einzuordnen.



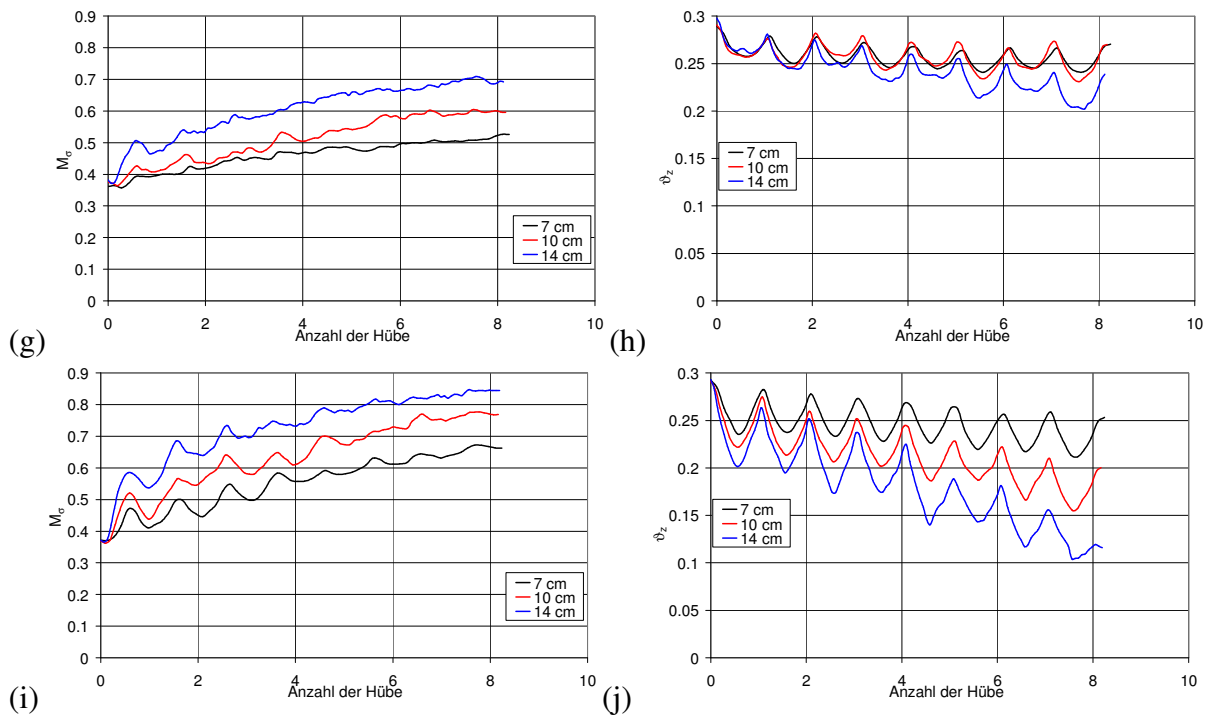


Abbildung 4.9: Einfluss der Hublänge bei 10 mm Kugeln:

- (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex für Zweigruppen-Modus;
- (c) Mischungsindex, (d) Segregationsindex für Dreigruppen-Modus;
- (e) Mischungsindex, (f) Segregationsindex für Wellen-Modus;
- (g) Mischungsindex, (h) Segregationsindex für Gleichhub-Modus;
- (i) Mischungsindex, (j) Segregationsindex für Gegenhub-Modus

Der Segregationsindex zeigt für alle Bewegungsmuster einen leichten Anstieg am Ende des Versuches. Dieser Effekt wird dadurch verursacht, dass die Stäbe zum Schluss zu ihrer Initialposition zurückkehren und so die lokale Höhe des Partikelbetts abnimmt, was einen direkten Einfluss auf die relative Position (Gleichung (4.4)) und damit den Segregationsindex (Gleichung (4.6)) hat. Aus diesem Grund ist die Bewegung der Stäbe auch ganz deutlich im Segregationsindex wiederzuerkennen. Beim Mischungsindex ist dies, aufgrund der abweichenden Probenahme, nicht der Fall.

Wie bereits erwähnt, ist die Initialverteilung der höchste Zustand der Segregation, da die Partikel per Hand in klar getrennten Schichten aufgegeben werden. Aufgrund dessen nimmt der Mischungsindex beginnend beim Wert von 0,4 stetig zu und der Segregationsindex beginnend bei 0,3, abgesehen von den kurzzeitigen Anstiegen durch die Stabbewegung, stetig ab.

Für den Gegenhub-Modus zeigt der Segregationsindex für 7 cm und 10 cm keinen wesentlichen Unterschied (Abbildung 4.9 (h)), im Gegensatz zum Mischungsindex (Abbildung 4.9 (g)). Dies liegt daran, dass der Mischungsindex generell sensitiver auf Änderungen der Parti-

kelverteilung reagiert als der Segregationsindex. Er detektiert sogar lokal begrenzte Änderungen, wohingegen der Segregationsindex eher globale Änderungen des Mischungsprozesses anzeigt.

Die monodispersen Experimente mit den 5 mm und den 20 mm Kugeln haben bezüglich des Einflusses der Hublänge die gleichen Effekte gezeigt wie die dargestellten Ergebnisse der Versuche mit den 10 mm Kugeln. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Ergebnisse an dieser Stelle nicht präsentiert. Es werden der Vollständigkeit halber nur die Endverteilungen dieser Versuche in den beiden folgenden Abbildungen gezeigt.

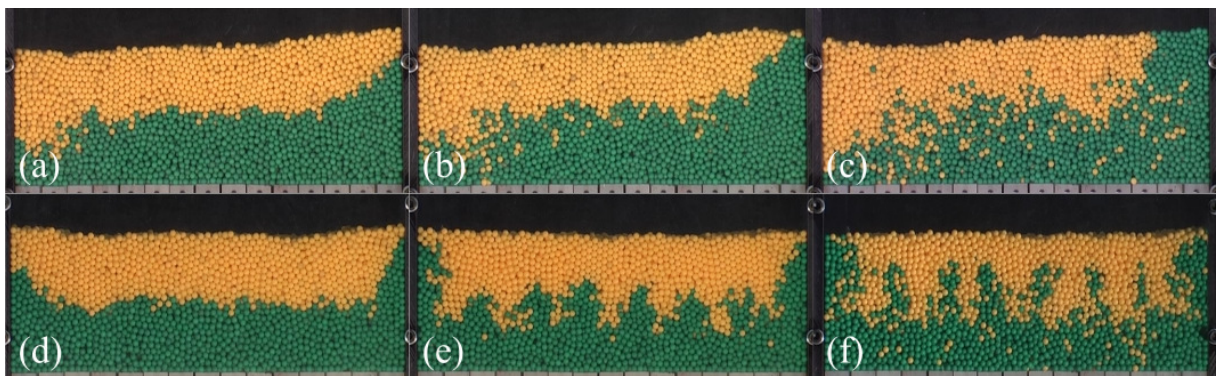


Abbildung 4.10: Endverteilung mit 5 mm Kugeln:

Dreigruppen-Modus mit	(a) 5 cm, (b) 7 cm und (c) 10 cm Hublänge
Gegenhub-Modus mit	(d) 7 cm, (e) 10 cm und (f) 14 cm Hublänge

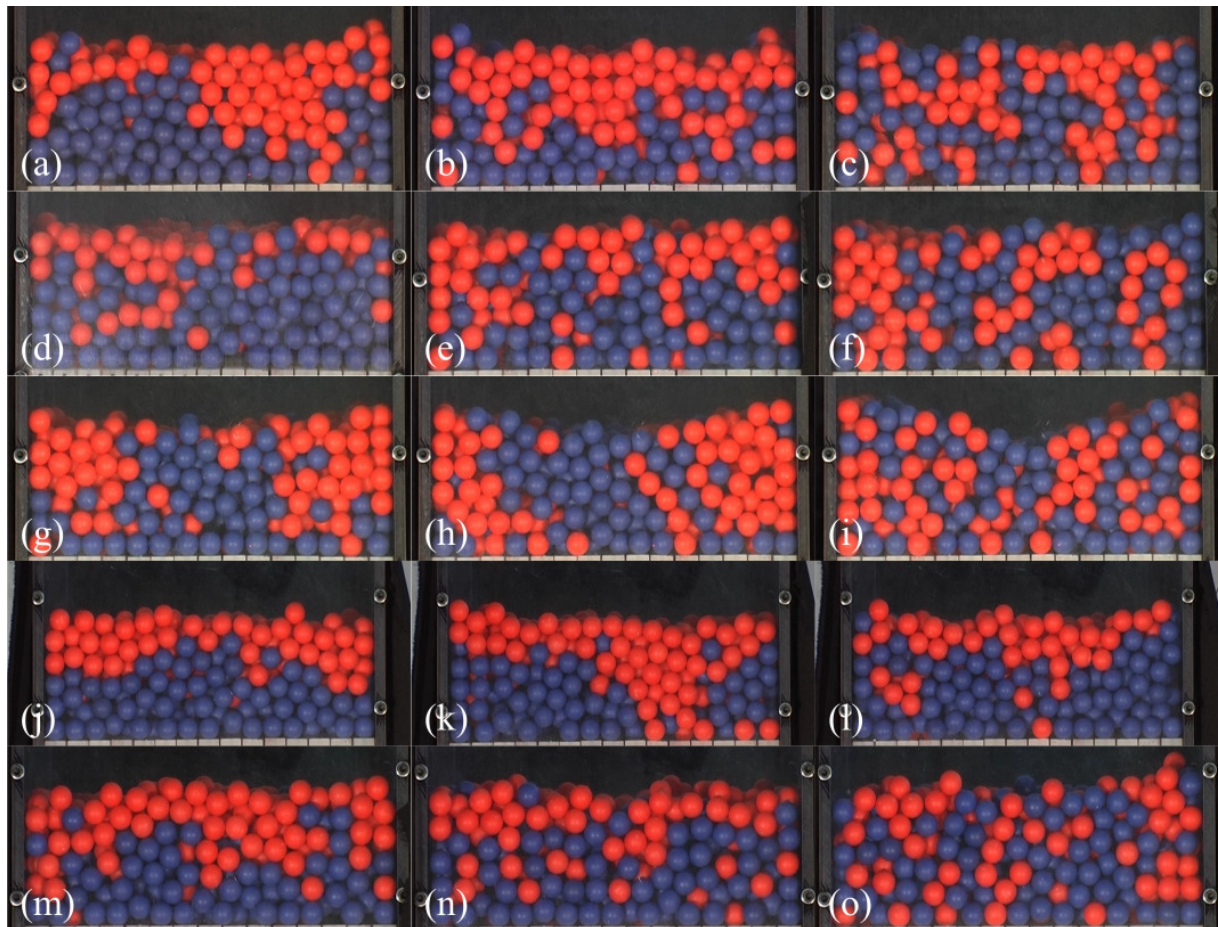


Abbildung 4.11: Endverteilung mit 20 mm Kugeln:

Zweigruppen-Modus mit	(a) 5 cm, (b) 7 cm und (c) 10 cm Hublänge
Dreigruppen-Modus mit	(d) 5 cm, (e) 7 cm und (f) 10 cm Hublänge
Wellen-Modus mit	(g) 5 cm, (h) 7 cm und (i) 10 cm Hublänge
Gleichhub-Modus mit	(j) 7 cm, (k) 10 cm und (l) 14 cm Hublänge
Gegenhub-Modus mit	(m) 7 cm, (n) 10 cm und (o) 14 cm Hublänge

4.5.3 Vergleich der Bewegungsmuster

Die Güte eines spezifischen Bewegungsmusters kann anhand der Verbesserung des Mischungszustandes ΔM_σ (Abbildung 4.12 (a)) bestimmt werden. Alle Bewegungsmuster mit Ausnahme des Gleichhub-Modus erreichen vergleichbare Verbesserungen für gleiche Hublängen. Die höchste Verbesserung des Mischungszustandes erzielt der Gegenhub-Modus bei einer Hublänge von 14 cm. In den meisten Modi ist eine lineare Zunahme von ΔM_σ mit steigender Hublänge zu erkennen. Eine Ausnahme stellt diesbezüglich der Wellen-Modus dar, hier scheint ein Sättigungseffekt aufzutreten, die Verbesserung des Mischungszustandes nimmt bei der Steigerung der Hublänge von 7 auf 10 cm nicht mehr so stark zu.

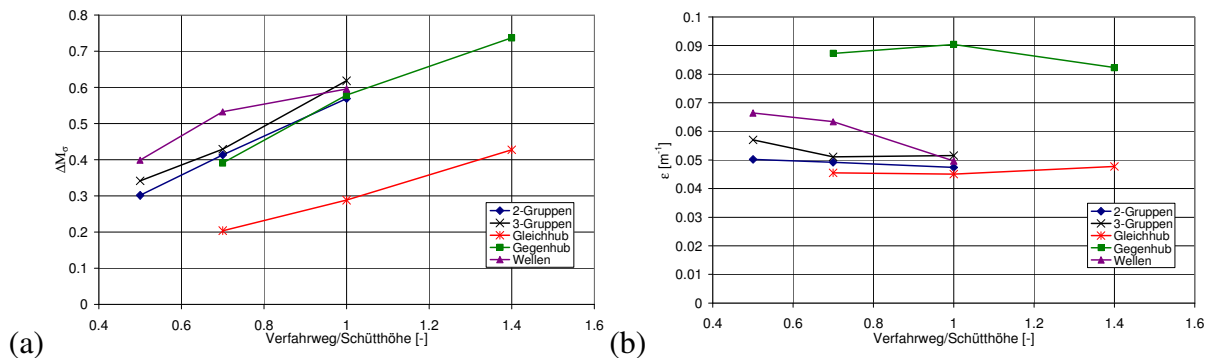


Abbildung 4.12: Vergleich der Bewegungsmuster mit 10 mm Kugeln: (a) Verbesserung des Mischungszustandes, (b) Mischungseffizienz

Interessant für die praktische Anwendung sind die Ergebnisse der Mischungseffizienz für verschiedene Bewegungsmuster (Abbildung 4.12 (b)). Hier zeigt sich, dass der Gegenhub-Modus mit Abstand der Effizienteste, bezogen auf den mechanischen Aufwand, ist. Dies liegt daran, dass er sehr gute Mischungszustände erzielt, obwohl sich nur die Hälfte der Stäbe bewegt. Die anderen Modi liegen auf einem vergleichbaren Niveau. Selbst der Gleichhub-Modus, der mit Abstand die schlechtesten Mischzustände erreicht hat, erzielt diese Effizienzen, da der mechanische Aufwand durch die vielen stehenden Stäbe gering ist. Generell lässt sich sagen, dass die Mischungseffizienz nahezu unabhängig von der Hublänge ist, d. h. dass die Steigerung der Hublänge und damit der mechanische Mehraufwand direkt und im gleichen Maße in besseren Mischzuständen resultiert. Eine Ausnahme stellt auch hier wieder der Wellen-Modus dar, da wie gesehen hier eine Sättigung erreicht wird und damit dies bei der Steigerung von 7 auf 10 cm Hublänge nicht mehr gilt.

Die durchgeführten Versuche mit 5 mm Kugeln (Abbildung 4.13 (a)) zeigen ebenfalls diese Unabhängigkeit der Effizienz von der Hublänge. Bei den Versuchen mit den 20 mm Kugeln (Abbildung 4.13 (b)) ist dies nicht der Fall. Hier nimmt die Effizienz bei dem Zweigruppen- und Gleichhub-Modus zunächst zu und bei dem Wellen- und Gegenhub-Modus zunächst ab, die Effizienz beim Dreigruppen-Modus ist auch hier nahezu unabhängig von der Hublänge. Des Weiteren fällt auf, dass der Gleichhub-Modus nur sehr geringe Effizienzen erreicht und nicht auf dem Niveau der anderen Modi liegt. Beide Effekte werden durch die Übereinstimmung der Stabbreite (2 cm) mit dem Kugeldurchmesser hervorgerufen. Dadurch kommt es zu starken Brückenbildungen, die umso stärker sind, umso geringer der Abstand zwischen zwei gleich bewegten Stäben ist. Beim Zweigruppen- und Gleichhub-Modus ist nur ein Stab zwischen zwei gleich bewegten Stäben, beim Dreigruppen-Modus sind es zwei, beim Gegenhub-Modus drei und beim Wellen-Modus ist es nicht einheitlich, sondern geht von nur einem bis zu 12. Im Gleichhub-Modus z.B. ist dieser Effekt so stark, dass in den ersten Hüben die gesamte Schüttung hoch und runter bewegt wird und die Partikel überhaupt nicht gemischt wer-

den. Aus diesem Grund zeigt dieser Modus auch die geringsten Effizienzen. Im Zweigruppen-Modus, der ebenfalls nur einen Stab Abstand zwischen zwei gleich bewegten Stäben hat, ist dieser Effekt nicht ganz so stark, da jeder Stab bewegt ist und die Brücken dadurch schneller aufgebrochen werden.

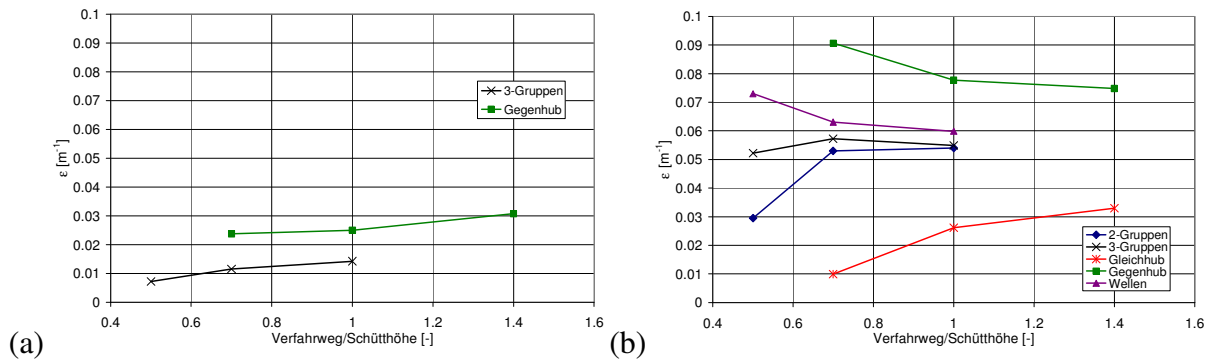


Abbildung 4.13: Mischungseffizienz für die Bewegungsmuster der Versuche mit
(a) 5 mm Kugeln und (b) 20 mm Kugeln

4.5.4 Einfluss des Partikeldurchmessers

In Abbildung 4.14 sind die Endverteilungen der monodispersen Versuche mit den 5, 10 und 20 mm Kugeln im Vergleich abgebildet. Im Zweigruppen-Modus (Abbildung 4.14 (a, b)) ist deutlich zu sehen, dass die Vermischung bei dem Versuch mit 20 mm Kugeln stärker ist als mit den 10 mm Kugeln. Beim Versuch mit 10 mm Kugeln sind noch keine roten oder gelben Partikel in die unteren Schichten gelangt, wohingegen bei den 20 mm Kugeln rote Partikel schon relativ stark im unteren Teil der Schüttung vertreten sind. Ähnlich ist dies bei dem Dreigruppen- (Abbildung 4.14 (c, d, e)) und bei dem Gegenhub-Modus (Abbildung 4.14 (j, k, l)). Mit 5 mm Kugeln ist bei beiden Modi bis auf die Randbereiche die Anfangsverteilung noch nahezu erhalten geblieben, was für die 10 und 20 mm Kugeln nicht gilt. Für den Wellen- (Abbildung 4.14 (f, g)) und den Gleichhub-Modus (Abbildung 4.14 (h, i)) ist visuell kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchen auszumachen. Wobei anzumerken ist, dass durch den Unterschied von zwei Farben bei den Versuchen mit 20 mm und vier Farben bei den Versuchen mit 10 mm Kugeln nur bei starken Abweichungen optische Differenzen ausgemacht werden können.

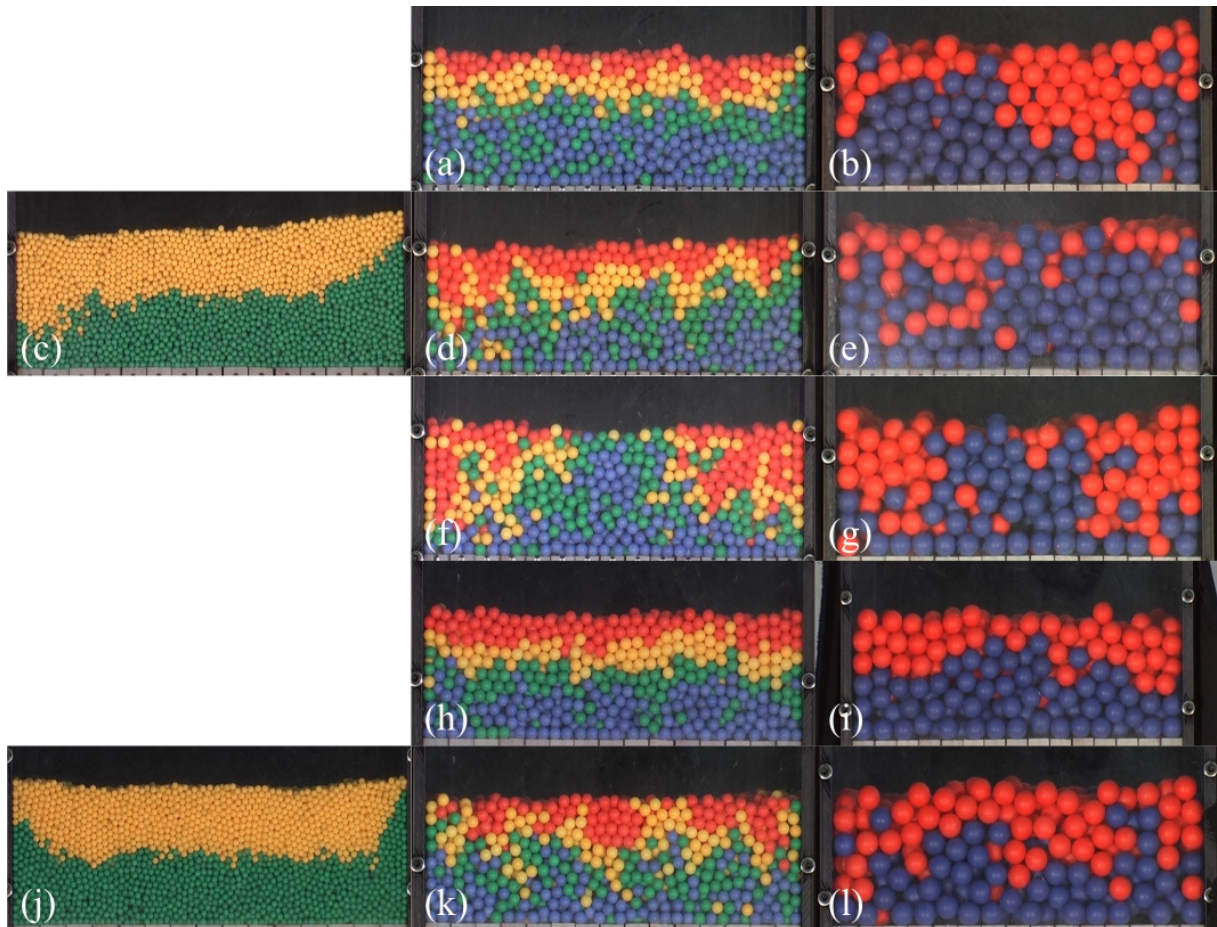


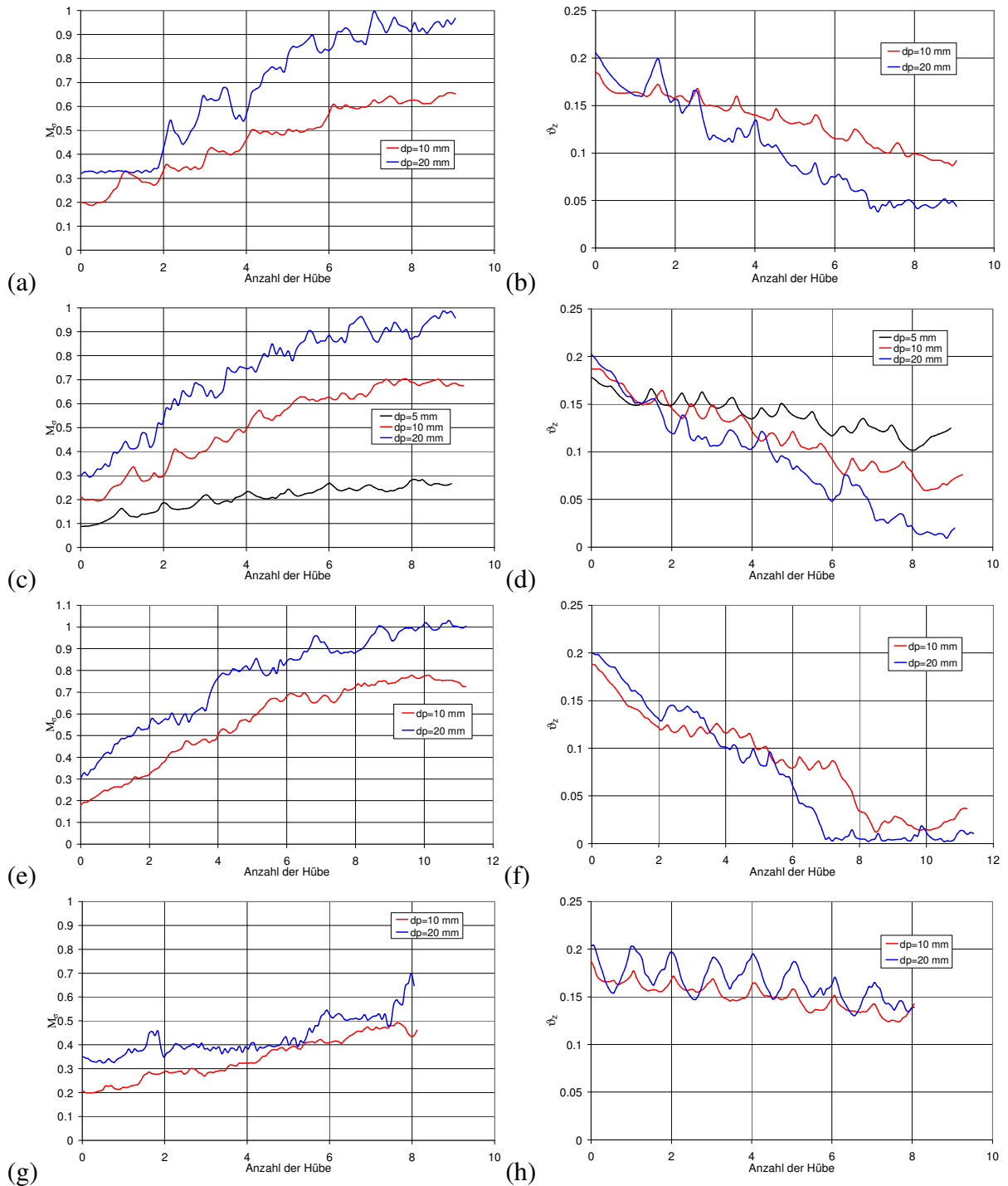
Abbildung 4.14: Endverteilung mit 5 cm (a bis g) bzw. 7 cm (h bis l) Hublänge:

Zweigruppen-Modus mit		(a) 10 mm und (b) 20 mm Kugeln
Dreigruppen-Modus mit	(c) 5 mm,	(d) 10 mm und (e) 20 mm Kugeln
Wellen-Modus mit		(f) 10 mm und (g) 20 mm Kugeln
Gleichhub-Modus mit		(h) 10 mm und (i) 20 mm Kugeln
Gegenhub-Modus mit	(j) 5 mm,	(k) 10 mm und (l) 20 mm Kugeln

Bei der Bestimmung der Mischungsparameter für die Versuche mit 10 mm Kugeln wurden für eine bessere Vergleichbarkeit die oberen beiden und die unteren beiden Schichten zu jeweils einer Schicht zusammengefasst, sodass auch bei diesen Versuche nur von zwei Partikel-lagen ausgegangen wird.

Die aus den Endverteilungen gewonnen visuellen Eindrücke lassen sich durch die Mischungsparameter (Abbildung 4.15) bestätigen. Im Zweigruppen- (Abbildung 4.15 (a, b)), im Dreigruppen- (Abbildung 4.15 (c, d)) und im Gegenhub-Modus (Abbildung 4.15 (i, j)) ist eine ganz deutliche Zunahme der Mischung mit zunehmendem Partikeldurchmesser sowohl im Mischungs- als auch im Segregationsindex zu sehen. Im Wellen- (Abbildung 4.15 (e, f)) und im Gleichhub-Modus (Abbildung 4.15 (g, h)) ist dies vor allem für den Segregationsindex

nicht der Fall. Dieser verläuft für die unterschiedlichen Durchmesser über nahezu den ganzen Versuch auf einem ähnlichem Niveau. Dabei ist zu beachten, dass der Segregationsindex nicht so sensitiv auf Änderungen der Partikelverteilung reagiert wie der Mischungsindex. Dieser zeigt auch für den Wellen- und den Gleichhub-Modus einen sichtbaren Unterschied. In beiden Modi liegt der Mischungsindex für die 20 mm Kugeln über dem der 10 mm Kugeln.



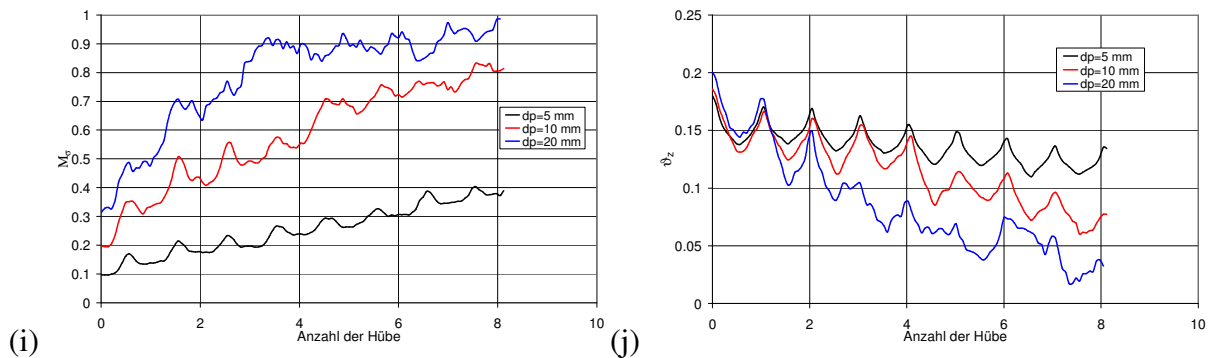


Abbildung 4.15: Einfluss des Partikeldurchmessers bei 10 cm (a bis g) bzw. 14 cm (h bis l) Hublänge:

- (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex für Zweigruppen-Modus;
- (c) Mischungsindex, (d) Segregationsindex für Dreigruppen-Modus;
- (e) Mischungsindex, (f) Segregationsindex für Wellen-Modus;
- (g) Mischungsindex, (h) Segregationsindex für Gleichhub-Modus;
- (i) Mischungsindex, (j) Segregationsindex für Gegenhub-Modus

Des Weiteren fällt auf, dass der Mischungsindex bei allen Bewegungsmustern für die verschiedenen Partikelgrößen unterschiedliche Startwerte hat. Und zwar beginnt der Mischungsindex für die 5 mm Kugeln bei ca. 0,1, für die 10 mm Kugeln bei ca. 0,2 und für die 20 mm Kugeln bei ca. 0,3. Der Grund dafür ist, dass der Mischungsindex über lokale Stichproben mit einer bestimmten Kugellanzahl ermittelt wird und bei 20 mm Kugeln insgesamt wesentlich weniger Kugeln vorhanden sind als mit 10 oder 5 mm Kugeln, sodass die Grenzfläche zwischen den Schichten stärker gewichtet und somit ein stärkerer Mischungszustand detektiert wird.

In Abbildung 4.16 sind die Mischungseffizienzen für alle Bewegungsmuster mit verschiedenen Partikeldurchmessern dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind in Abbildung 4.16 (a) nur der Dreigruppen- und der Gegenhub-Modus dargestellt und in Abbildung 4.16 (b) die drei restlichen Modi, für die keine Versuche mit 5 mm Kugeln durchgeführt wurden.

Auch die Mischungseffizienz bestätigt die Erkenntnis, dass die Mischung mit steigendem Partikeldurchmesser zunimmt. Sowohl im Dreigruppen- und Gegenhub-Modus (Abbildung 4.16 (a)), die mit allen drei Kugeldurchmessern untersucht wurden, als auch im Zweigruppen-, Wellen- und Gleichhub-Modus (Abbildung 4.16 (b)) ist eine deutliche Zunahme der Effizienz mit steigendem Kugeldurchmesser zu sehen. Zu erklären ist dieses Ergebnis dadurch, dass bei größeren Kugeln durch die Stäbe mehr Masse in Bewegung gesetzt wird als bei kleineren Kugeln, da die Kraftketten umso länger sind, umso größer die Kugeln sind. Stehen zwei 20 mm Kugeln im Kontakt wird die Kraft, die auf eines dieser beiden Parti-

kel wirkt, direkt über eine Strecke von 40 mm übertragen, bei zwei 5 mm Partikeln ist die Strecke nur 10 mm lang. Aus diesem Grund ist das Einflussgebiet eines bewegten Stabes bei den 20 mm Kugeln viel größer als bei den 10 mm oder 5 mm Kugeln, weshalb mehr Mischung bei gleicher Bewegung induziert wird.

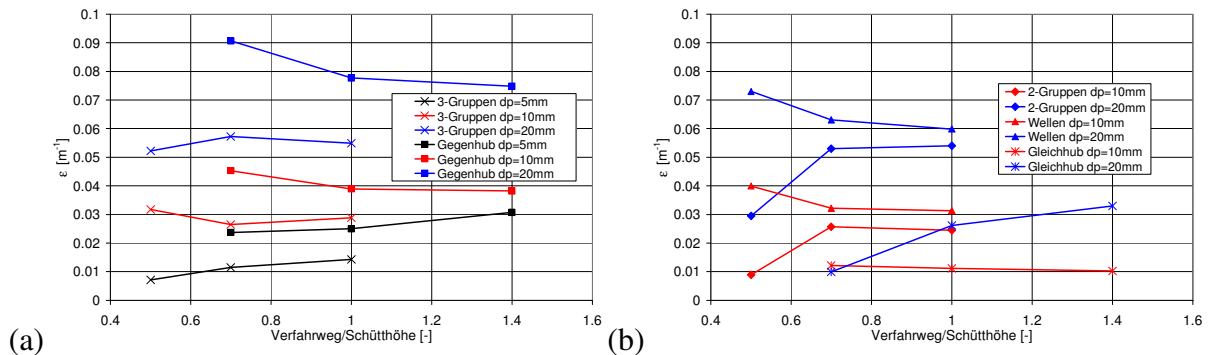


Abbildung 4.16: Mischungseffizienz für die Bewegungsmuster mit verschiedenen Partikeldurchmessern: (a) 5 mm Kugeln und (b) 20 mm Kugeln

4.6 Polydisperse Versuche

In Abbildung 4.17 sind die Endverteilungen der polydispersen Versuche abgebildet. Wie bei den monodispersen Versuchen ist auch hier der deutliche Einfluss der Hublänge zu sehen. Bei allen Bewegungsmustern ist die Größensegregation, d. h. das Aufsteigen der großen Kugeln in obere Lagen und das Absinken der kleinen Kugeln in untere Lagen, für die höchste Hublänge am weitesten fortgeschritten (Abbildung 4.17 (c, f, i, l, o)). Vor allem ist die Zunahme der Größensegregation mit zunehmender Hublänge beim Dreigruppen- (Abbildung 4.17 (d, e, f)), beim Wellen- (Abbildung 4.17 (g, h, i)) und beim Gegenhub-Modus (Abbildung 4.17 (m, n, o)) zu beobachten. Hier sind die großen Kugeln bei der geringsten Hublänge noch in unteren bis mittleren Lagen, bei der mittleren Hublänge steigen die großen Kugeln schon teilweise bis in obere Lagen auf und bei der höchsten Hublänge sind dann die meisten großen Kugeln nur noch in der obersten Schicht vertreten. Beim Zweigruppen- (Abbildung 4.17 (a, b, c)) und Gleichhub-Modus (Abbildung 4.17 (j, k, l)) fallen zusätzlich andere Effekte, wie die Gruppierung der großen Kugeln in der Mitte (Abbildung 4.17 (a, k)) und Streifen, die sich über die gesamte Höhe erstrecken, mit fast ausschließlich kleinen Kugeln (Abbildung 4.17 (b, c, j, l)), auf. Da bei diesen beiden Modi jeder zweite Stab die gleiche Bewegung ausführt, wird zu Beginn die gesamte Schüttung, aufgrund von Brückenbildungen in der unteren Schicht der großen Partikel, auf und ab bewegt. Im weiteren Verlauf wird die Schicht der großen Kugeln an einer Stelle aufgebrochen, an der es zu einem plötzlichen und schnellen Absinken der kleinen Partikel kommt. Diese rein zufällige Position bleibt dann bis zum Ende des Versuches weiterhin sichtbar. Die angesprochene Ansammlung der großen Kugeln in der Mitte in zwei

Versuchen wird dadurch verursacht, dass sich an den Seitenwänden größere Lücken zwischen großen Kugeln ergeben, durch die die kleineren Kugeln in untere Lagen fallen und so die großen Kugeln verdrängen.

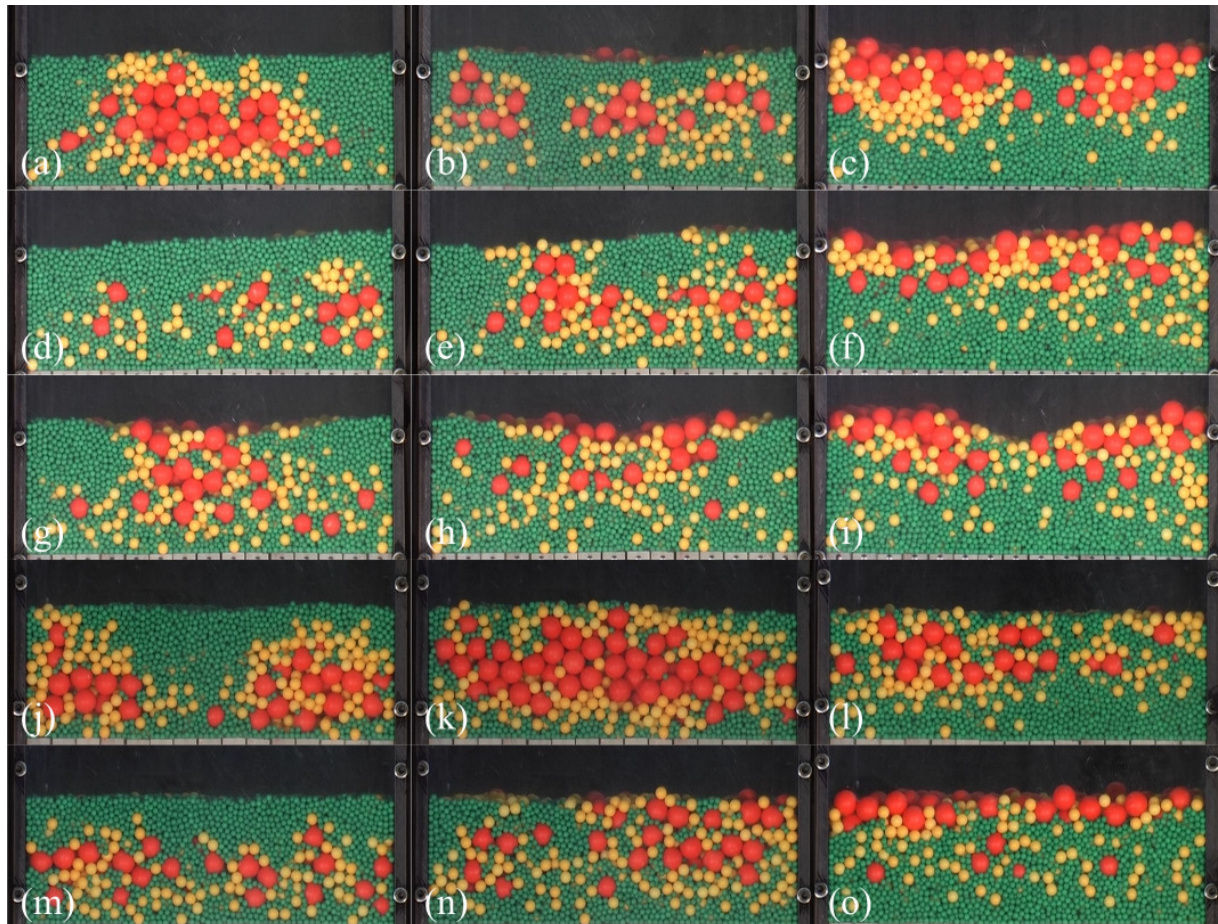


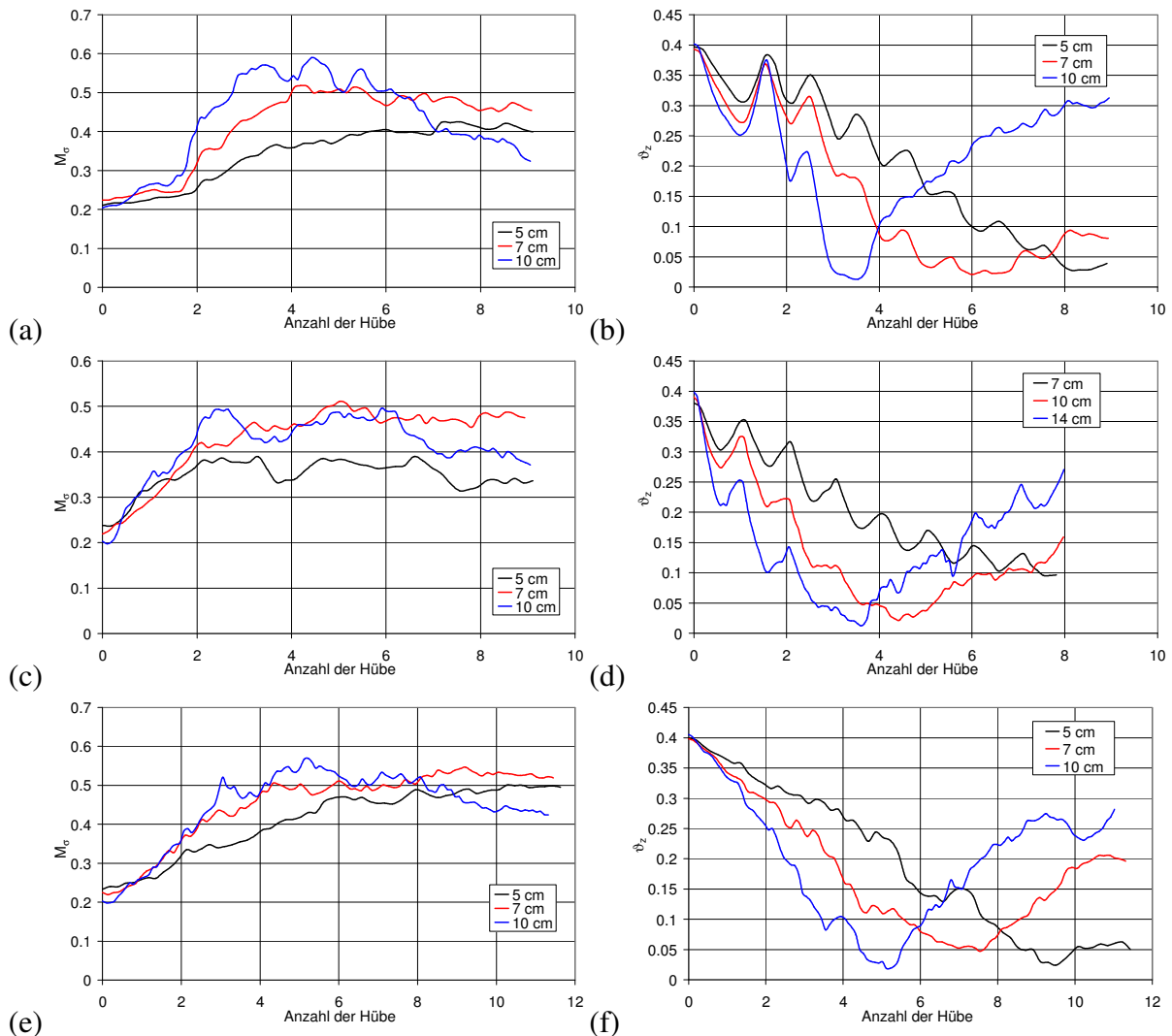
Abbildung 4.17: Endverteilung mit polydispenser Schüttung:

Zweigruppen-Modus mit	(a) 5 cm, (b) 7 cm und (c) 10 cm Hublänge
Dreigruppen-Modus mit	(d) 5 cm, (e) 7 cm und (f) 10 cm Hublänge
Wellen-Modus mit	(g) 5 cm, (h) 7 cm und (i) 10 cm Hublänge
Gleichhub-Modus mit	(j) 7 cm, (k) 10 cm und (l) 14 cm Hublänge
Gegenhub-Modus mit	(m) 7 cm, (n) 10 cm und (p) 14 cm Hublänge

Die Mischungsparameter (Abbildung 4.18) für diese Versuche zeigen ebenfalls den starken Einfluss der Hublänge auf den Mischungs- bzw. Segregationsprozess.

Zu Beginn der Versuche liegt ein hoher Zustand der Segregation, aufgrund der klar getrennten Schichten bzw. Partikelgrößen, vor. Der Mischungsindex startet deshalb bei allen Versuchen bei einem relativ geringen Wert von 0,2 und der Segregationsindex bei einem relativ hohen Wert von 0,4. Nach dem Start der Stabbewegung vermischen sich die Partikelgrößen, so dass

der Mischungsindex zu- und der Segregationsindex abnimmt. Diese Zu- bzw. Abnahme fällt bei allen Bewegungsmustern umso stärker aus, je größer die Hublänge ist. Nach einer gewissen Zeit erreicht der Mischungsindex ein Maximum und der Segregationsindex ein Minimum. Dieser maximale Mischungszustand, bei dem die kleinen, mittleren und großen Kugeln über der gesamten Schüttung verteilt sind, wird nicht in jedem Versuch erreicht. Im Zweigruppen- (Abbildung 4.18 (a, b)), Dreigruppen- (Abbildung 4.18 (c, d)), Gleichhub- (Abbildung 4.18 (g, h)) und Gegenhub-Modus (Abbildung 4.18 (i, j)) mit 5 bzw. 7 cm Hublänge ist der Vermischungsprozess noch nicht abgeschlossen. Nur im Wellen-Modus (Abbildung 4.18 (e, f)) wird auch mit der geringen Hublänge dieser Zustand erreicht. Anschließend trennen sich die Partikelgrößen, d. h. große Kugeln bewegen sich vermehrt in obere und kleine vermehrt in untere Schichten, wodurch der Mischungsindex wieder ab- und der Segregationsindex wieder zunimmt. Auch dieser Vorgang verläuft umso schneller, umso höher die Hublänge ist.



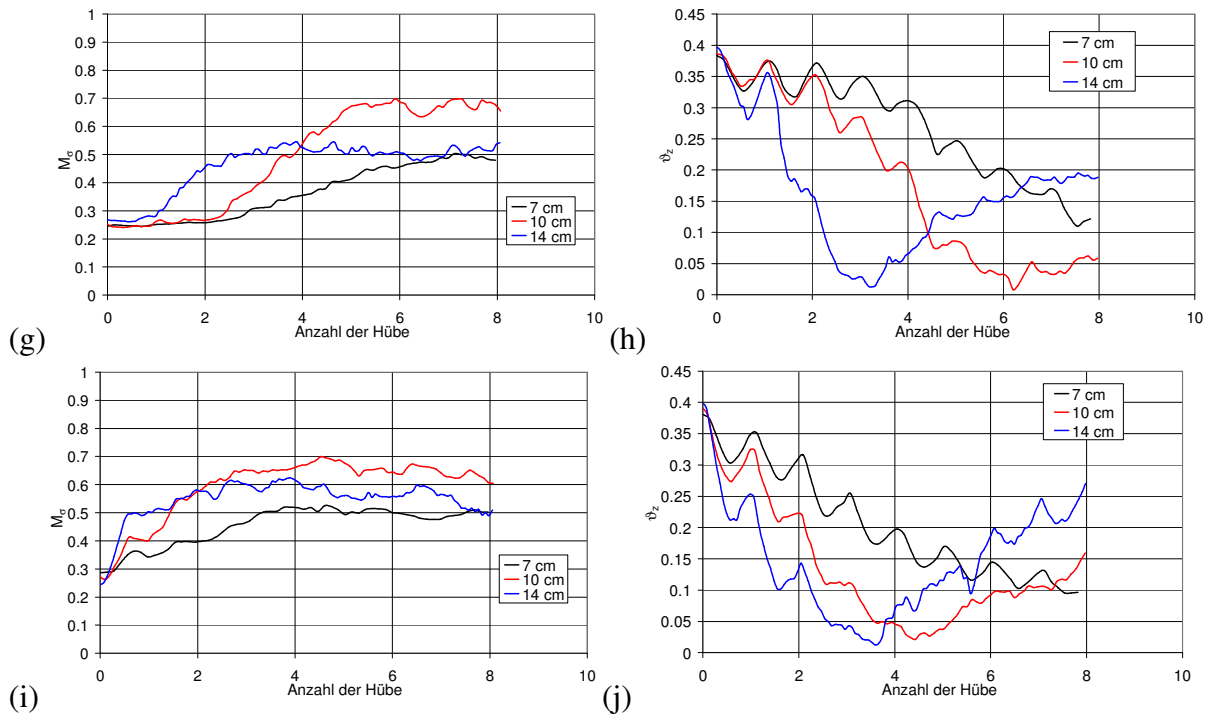


Abbildung 4.18: Einfluss der Hublänge bei polydisperser Schüttung:

- (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex für Zweigruppen-Modus;
- (c) Mischungsindex, (d) Segregationsindex für Dreigruppen-Modus;
- (e) Mischungsindex, (f) Segregationsindex für Wellen-Modus;
- (g) Mischungsindex, (h) Segregationsindex für Gleichhub-Modus;
- (i) Mischungsindex, (j) Segregationsindex für Gegenhub-Modus

4.7 DEM-Simulation der Experimente

Im Folgenden wird zunächst die DEM-Simulationsmethodik kurz erläutert. Anschließend erfolgt vor der Darstellung der Simulationsergebnisse im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen die Beschreibung der Bestimmung der Materialparameter für die DEM-Simulationen.

4.7.1 DEM-Simulationsmethodik

Die Translations- und Rotationsbewegung eines Partikels kann durch Integration der Newton'schen Bewegungsgleichungen (Gleichung (4.8)) bestimmt werden.

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{ij} + m_i \vec{g}; \quad \theta_i \frac{d^2 \vec{\phi}_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^N \vec{M}_{ij} \quad (4.8)$$

Darin ist $d^2 \vec{x}_i / dt^2$ die gesuchte Beschleunigung zur Berechnung der Geschwindigkeit und der Position, $d^2 \vec{\varphi}_i / dt^2$ die Winkelbeschleunigung zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit, m_i die Masse und θ_i das Trägheitsmoment des Partikels i . \vec{F}_{ij} und \vec{M}_{ij} sind die äußeren auf das Partikel wirkenden Kräfte und Momente, die hauptsächlich durch Stöße mit benachbarten Partikeln und Wänden verursacht werden.

Zur numerischen Integration der Bewegungsgleichungen können eine ganze Reihe verschiedener Integrationsmethoden benutzt werden. Aufgrund der ausreichenden Genauigkeit kombiniert mit dem relativ geringen Rechenaufwand wird das explizite Einschrittverfahren Forward Euler im DEM-Code des LEAT benutzt.

Die Normalkomponente der Stoßkraft wird mit Hilfe eines Feder-Dämpfer-Modells (Gleichung (4.9)) berechnet.

$$\vec{F}^n = \vec{F}_{el}^n + \vec{F}_{diss}^n = k^n \delta \vec{n} + \gamma^n \vec{v}^n \quad (4.9)$$

Dieses Modell setzt sich aus einem elastischen \vec{F}_{el}^n und einem dissipativen Anteil \vec{F}_{diss}^n zusammen. Der elastische Anteil wird über eine Feder mit der Steifigkeit k^n und der virtuellen Überlappung der Partikel δ modelliert. Der dissipative Anteil wird durch einen geschwindigkeitsproportionalen Dämpfer mit dem Dämpfungskoeffizienten γ^n und der Relativgeschwindigkeit der Partikel \vec{v}^n bestimmt.

Zur Ermittlung der Tangentialkomponente der Stoßkraft dient ein Tangentialfeder-Modell (Gleichung (4.10)) mit der Steifigkeit der linearen Feder k^t , dem Coulomb Reibungskoeffizienten μ_c und der relativen Federauslenkung $\vec{\xi}$.

$$\vec{F}^t = -\min(k^t \xi, \mu_c |\vec{F}^n|) \vec{\xi} / |\vec{\xi}| \quad (4.10)$$

Eine Zusammenstellung und Vergleich aller Kräfte-Modelle in Normal- und Tangentialrichtung gibt Kruggel-Emden in [28] und [29].

Die auf das Partikel wirkenden Momente resultieren hauptsächlich aus der Tangentialkomponente der Stoßkraft. Ein zusätzliches Moment ist das Rollreibungsmoment M_r (Gleichung (4.11)), das proportional zur Normalkraft und zur Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ für die Energie-dissipation der Rollbewegung sorgt. Der Proportionalitätsfaktor ist hierbei der Rollreibungskoeffizient μ_r .

$$\vec{M}_r = -\mu_r \vec{F}^n \vec{\omega} / |\vec{\omega}| \quad (4.11)$$

4.7.2 Materialparameter

Eine DEM-Simulation benötigt materialabhängige Parameter zur Modellierung des Kontaktes zwischen Partikeln und zwischen Partikeln und Wänden. Diese im vorangegangenen Abschnitt gezeigten Parameter sind der Reibungskoeffizient μ_c , der Rollreibungskoeffizient μ_r , die Normalfedersteifigkeit k^n , der Dämpfungskoeffizienten γ^n und die Tangentialfedersteifigkeit k^t . Zur Bestimmung dieser Parameter wurden drei verschiedene Versuche durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass diese Parameter sehr stark von der Stoßpaarung abhängen. Aus diesem Grund wurden Werte für den Kontakt der Polyoxymethyl (POM) Kugeln der drei verwendeten Durchmesser mit den Stäben aus Polypropylen (PP), mit den umgebenden Wänden aus Polycarbonat (PC) und mit sich selbst (POM) bestimmt. Des Weiteren sind durch die Bearbeitung die Oberseiten der Stäbe rau, wohingegen die Seitenflächen glatt sind, was auf einige Parameter einen Einfluss hat.

Zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten wurden 7x7 POM-Kugeln in quadratischer Anordnung unter eine Holzplatte geklebt, die durch einen Faden über den Untergrund gezogen werden kann (Abbildung 4.19). Der Untergrund besteht aus einer PP (rau und glatt)-, PC- oder POM-Platte, je nachdem welcher Reibungskoeffizienten ermittelt werden soll. Am Ende des Fadens ist eine Federmesswaage zur Bestimmung der Zugkraft angebracht. Neben dem Eigengewicht der Holzplatte und der Kugeln kann zusätzliches Gewicht aufgebracht werden, um die Normalkraft zu variieren. Bei der jeweiligen Belastung wird die Zugkraft gemessen, bei der sich die Holzplatte in Bewegung setzt. Aus dieser Zugkraft mit der dazugehörigen Belastung lässt sich der Reibungskoeffizient dieser Paarung berechnen. Dabei wurde für jede Belastung eine Messreihe von 20 bis 30 Messpunkten durchgeführt und der Reibungskoeffizient (Tabelle 4.1) bestimmt.

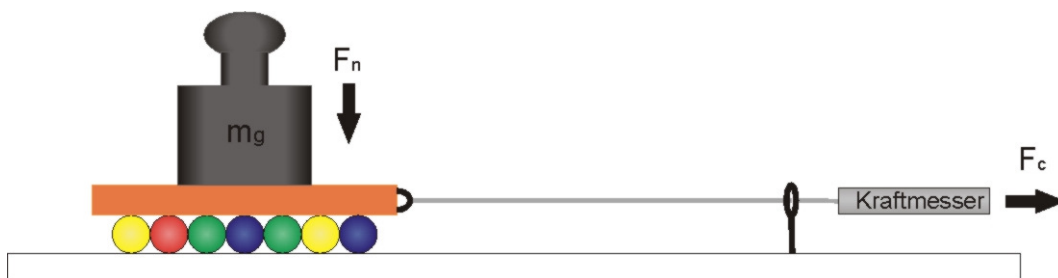


Abbildung 4.19: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten

Tabelle 4.1: Reibungskoeffizient für POM auf PP (glatt, rau), PC und POM

	PP(glatt)	PP(rau)	PC	POM
Reibungskoeffizient μ_c [-]	0,0937	0,0937	0,1906	0,1212

In dem zweiten Versuch zur Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten wurden die POM-Kugeln der verschiedenen Durchmesser auf einer ebenen Platte rollen gelassen (Abbildung 4.20). Mit einer Kamera wurde der Rollvorgang von oben gefilmt, um anschließend über eine Bildauswertung die Geschwindigkeitsabnahme und die zurückgelegte Strecke zu ermitteln. Über diese beiden gemessenen Werte lässt sich die Energiedissipation und damit der Rollreibungskoeffizient der entsprechenden Kontaktpaarung (Tabelle 4.2) bestimmen.



Abbildung 4.20: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Rollreibungskoeffizienten

Tabelle 4.2: Rollreibungskoeffizient für POM-Kugeln auf PP (glatt, rau), PC und POM

	PP(glatt)	PP(rau)	PC	POM
μ_r [m] 5 mm Kugel	$5,0116 \cdot 10^{-5}$	$14,6457 \cdot 10^{-5}$	$4,3600 \cdot 10^{-5}$	$3,4404 \cdot 10^{-5}$
μ_r [m] 10 mm Kugel	$5,6711 \cdot 10^{-5}$	$12,4689 \cdot 10^{-5}$	$2,9733 \cdot 10^{-5}$	$5,2571 \cdot 10^{-5}$
μ_r [m] 20 mm Kugel	$3,6299 \cdot 10^{-5}$	$15,2014 \cdot 10^{-5}$	$2,7750 \cdot 10^{-5}$	$4,1468 \cdot 10^{-5}$

Die Federsteifigkeiten k'' und k' sowie der Dämpfungskoeffizienten γ'' sind keine physikalischen Eigenschaften des Materials und können demnach auch nicht direkt bestimmt werden. Diese Parameter sind entsprechend dem verwendeten Kraftmodell so einzustellen, dass die reale Stoßzahl e'' , d.h. das Verhältnis von Geschwindigkeit vor zur Geschwindigkeit nach dem Stoß, resultiert. Aus diesem Grund dient der letzte Versuch (Abbildung 4.21) der Ermittlung der Stoßzahl.

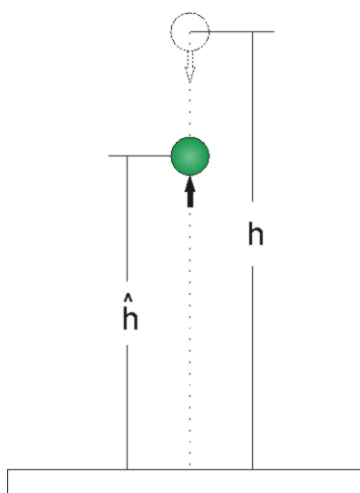


Abbildung 4.21: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Stoßzahl

Dazu wird eine Kugel aus einer bestimmten Anfangshöhe h auf eine ebene Platte fallen gelassen und die Sprunghöhe \hat{h} gemessen. Aus der Anfangshöhe und der Sprunghöhe lassen sich die Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß und damit die Stoßzahl berechnen. Die gemessenen Stoßzahlen, die dazugehörigen Steifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten sind in der Tabelle 4.3 aufgelistet.

Tabelle 4.3: Stoßparameter für Normal- und Tangentialkraftmodell

	PP(glatt)	PP(rau)	PC	POM
e^n [-] 5 mm Kugel	0.9091	0,8337	0.9218	0.9407
e^n [-] 10 mm Kugel	0,8695	0,8695	0,8384	0,9260
e^n [-] 20 mm Kugel	0.8038	0.7793	0.6970	0.8726
k^n [N] 5 mm Kugel	100.000	100.000	100.000	100.000
k^n [N] 10 mm Kugel	100.000	100.000	100.000	100.000
k^n [N] 20 mm Kugel	100.000	100.000	100.000	100.000
γ^n [kg/s] 5 mm Kugel	0,17081	0,32644	0,14654	0,0781
γ^n [kg/s] 10 mm Kugel	0,755	0,755	0,9532	0,2938
γ^n [kg/s] 20 mm Kugel	3,29287	3,76622	5,42794	1,4658
k^t [kg/s] 5 mm Kugel	78.715,38	78.523,06	77.738,15	78.757,58
k^t [kg/s] 10 mm Kugel	78.632,81	78.632,81	77.546,79	78.740,91
k^t [kg/s] 20 mm Kugel	78.410,85	78.294,66	76.779,33	78.638,46

4.7.3 Ergebnisse

In der Abbildung 4.22 sind die Initialzustände der DEM-Simulationen im Vergleich mit den Anfangszuständen der Experimente abgebildet. Aus Rechenzeitgründen wurden dabei keine Simulationen der monodispersen Schüttung mit 5 mm Kugeln und der polydispersen Schüttung durchgeführt.

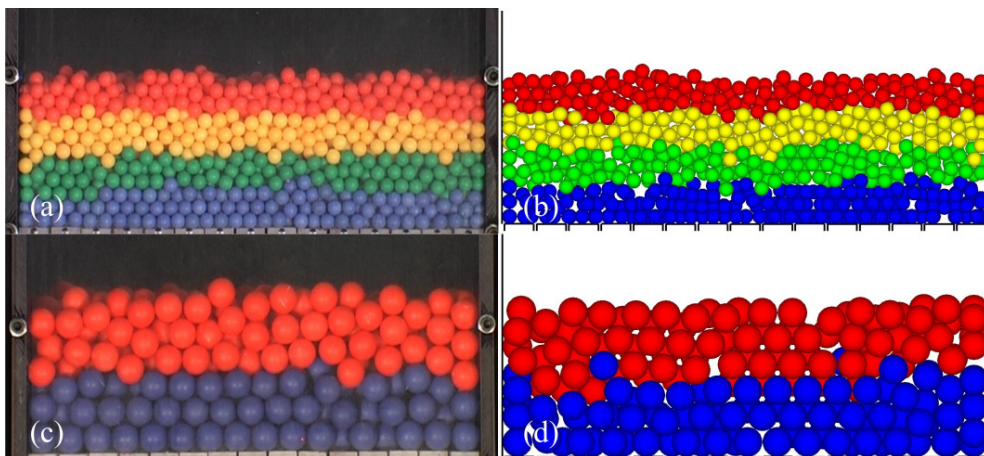


Abbildung 4.22: Initialzustand der 10 mm Versuche (a) Experiment (b) Simulation und der 20 mm Versuche (c) Experiment (d) Simulation

Die Endverteilungen der Simulationen der fünf Bewegungsmuster mit 10 mm Kugeln, 10 mm/s Stabgeschwindigkeit und 10 cm Hublänge sind im Vergleich mit den Experimenten in Abbildung 4.23 dargestellt. In den Endverteilungen des Experiments (Abbildung 4.23 (a)) und der Simulation (Abbildung 4.23 (b)) des Zweigruppen-Modus sind deutliche Parallelen zu erkennen. In beiden Fällen sind eine auffällige Abnahme an roten Kugeln und die generell ähnliche Anordnung der vier Farben festzustellen. Die Simulation des Dreigruppen-Modus (Abbildung 4.23 (d)) zeigt genau wie das Experiment (Abbildung 4.23 (c)) auch eine Rotation der gesamten Schüttung entgegengesetzt zum Uhrzeigersinn. Die roten und gelben Kugeln sind zum Schluss vermehrt im oberen linken Bereich der Schüttung und die blauen und grünen Kugeln dagegen in der unteren linken Region. Auch der Wellen-Modus zeigt sehr ähnliche Endverteilungen im Experiment (Abbildung 4.23 (e)) und Simulation (Abbildung 4.23 (f)). Sowohl die Zunahme der Schütthöhe von der Mitte nach beiden Seiten als auch die symmetrische Anordnung der Farben zur Mittellinie wird durch die DEM-Simulation wiedergegeben. Im Ergebnis der Simulation des Gleichhub-Modus (Abbildung 4.23 (h)) fällt die räumliche gefügeartige Anordnung der Partikel in den oberen Schichten der Schüttung auf. Dieses Phänomen ist im Experiment (Abbildung 4.23 (g)) auch vorhanden nur ist es hier nicht so deutlich zu sehen, da in den Lücken zwischen den Partikel der ersten Schicht entweder die Farbe der dahinterliegenden Kugeln oder schwarzer Hintergrund zu sehen ist. In der Endverteilung der Simulation dagegen sind, für eine bessere Bildauswertung, nur die ersten beiden vorderen Schichten sichtbar, wodurch ein weißer Hintergrund entsteht und die Anordnung der Partikel besser hervorgehoben wird. Zu erklären ist dieses Phänomen dadurch, dass bei diesem Modus generell wenig Mischung in den oberen Schichten stattfindet, sodass sich die Kugeln aufgrund der Bewegung der unteren Schichten in diese Anordnung begeben.

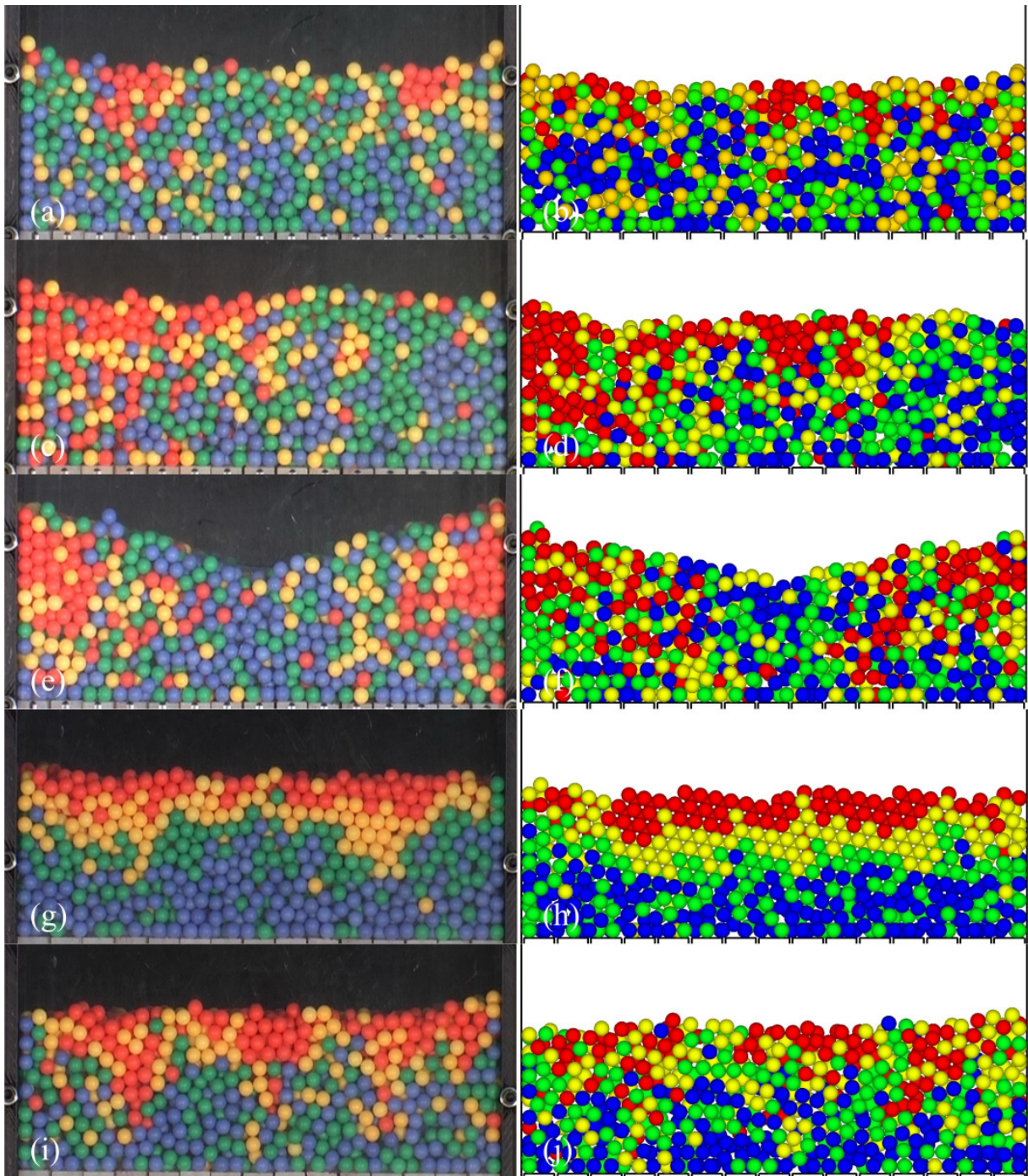
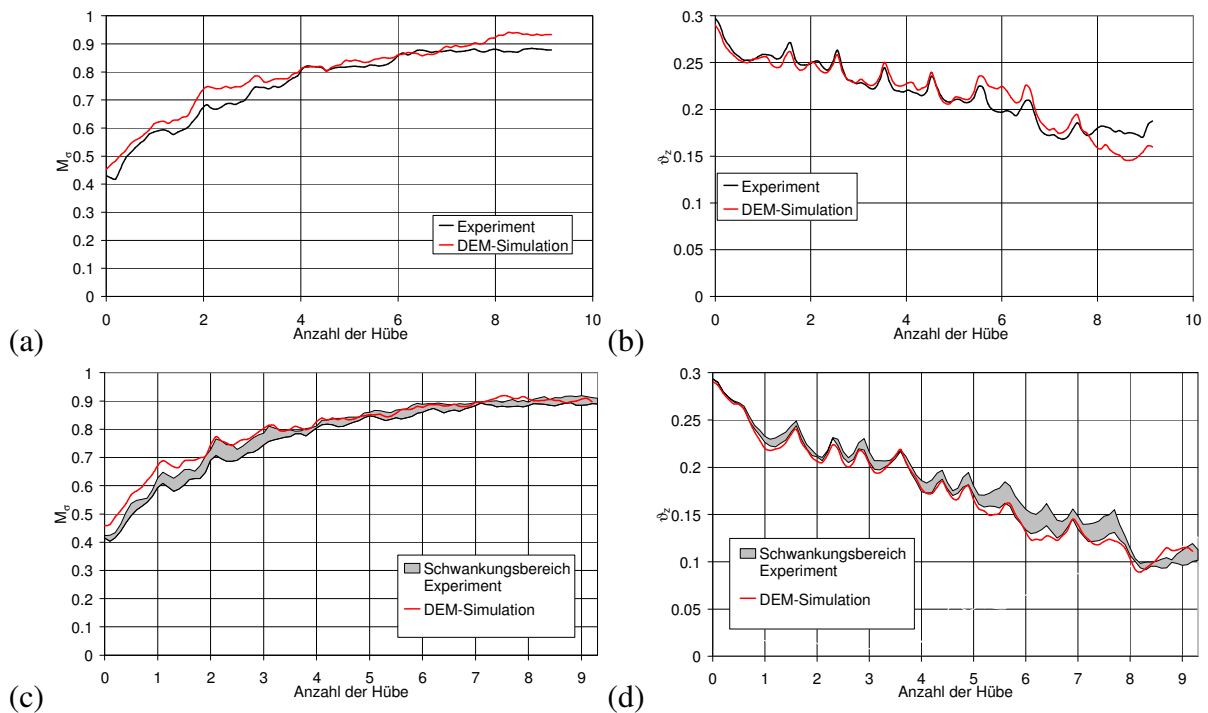


Abbildung 4.23: Endverteilung mit 10 mm Kugeln und 10 cm Hublänge:

Zweigruppen-Modus mit	(a) Experiment, (b) DEM-Simulation
Dreigruppen-Modus mit	(c) Experiment, (d) DEM-Simulation
Wellen-Modus mit	(e) Experiment, (f) DEM-Simulation
Gleichhub-Modus mit	(g) Experiment, (h) DEM-Simulation
Gegenhub-Modus mit	(i) Experiment, (j) DEM-Simulation

Auch im letzten Modus dem Gegenhub-Modus zeigt die Simulation (Abbildung 4.24 (j)) die gleichen makroskopischen Effekte wie das entsprechende Experiment (Abbildung 4.24 (i)). Hier sind drei Gruppen roter Kugeln links, in der Mitte und rechts im oberen Bereich der Schüttung auffällig. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der visuelle Vergleich der Experimente und Simulationen eine sehr gute Übereinstimmung für alle Bewegungsmuster zeigt.

Die qualitative visuelle Übereinstimmung wird durch die in Abbildung 4.24 dargestellten Mischungsparameter bestätigt. Der Verlauf des berechneten Segregationsindex stimmt sehr gut mit dem der Experimente überein (Abbildung 4.24 (b, d, f, h, j)). Kleinere Unterschiede sind nur am Ende des Zweigruppen- (Abbildung 4.24 (b)) und nach ca. 9 Hüben beim Wellen-Modus (Abbildung 4.24 (f)) zu erkennen. Der Mischungsindex startet in allen Bewegungsmustern für die Simulationen bei einem leicht höheren Wert als für die Experimente (Abbildung 4.24 (a, c, e, g, i)). Diese Differenz wird durch einen kleinen Unterschied der Initialzustände der Simulation und des Experimentes verursacht. Wie bereits erwähnt, wird der Initialzustand in den Experimenten durch die sorgfältige Aufgabe der Farbschichten per Hand erzeugt, dies ist in der Simulation nicht in dem Maße reproduzierbar, weshalb ein geringfügig höherer Mischungsindex resultiert. Im weiteren Verlauf des Mischungsindex bleibt diese kleine Differenz erhalten, sodass der Mischungsindex der Simulationen in allen Bewegungsmustern über dem der Experimente liegt.



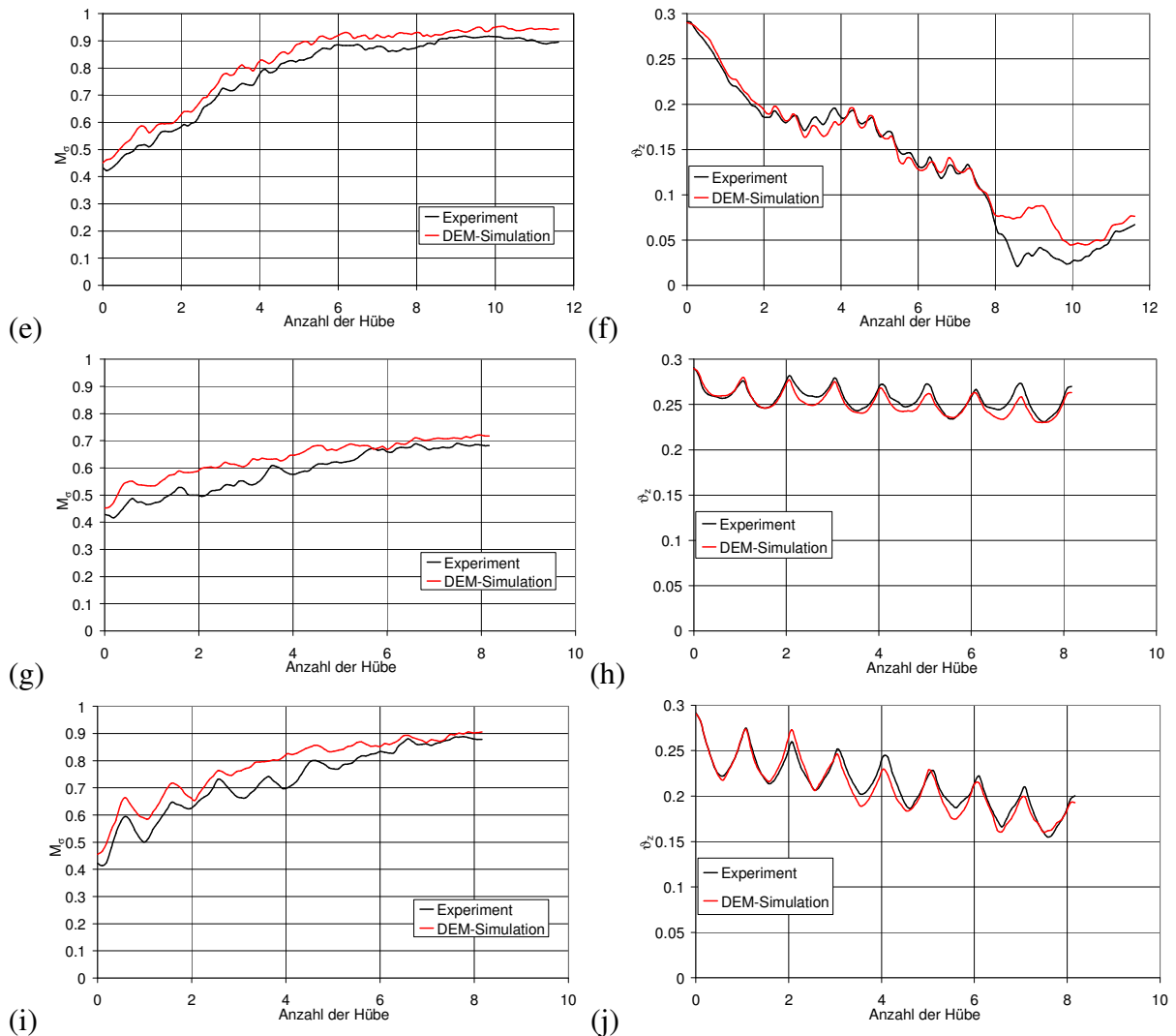


Abbildung 4.24: Vergleich Experiment und Simulation bei 10 mm Kugeln und 10 cm Hublänge: (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex für Zweigruppen-Modus; (c) Mischungsindex, (d) Segregationsindex für Dreigruppen-Modus; (e) Mischungsindex, (f) Segregationsindex für Wellen-Modus; (g) Mischungsindex, (h) Segregationsindex für Gleichhub-Modus; (i) Mischungsindex, (j) Segregationsindex für Gegenhub-Modus

In der folgenden Abbildung 4.25 sind die Endverteilungen der monodispersen Simulationen mit den 20 mm Kugeln im Vergleich mit den entsprechenden Experimenten gezeigt.

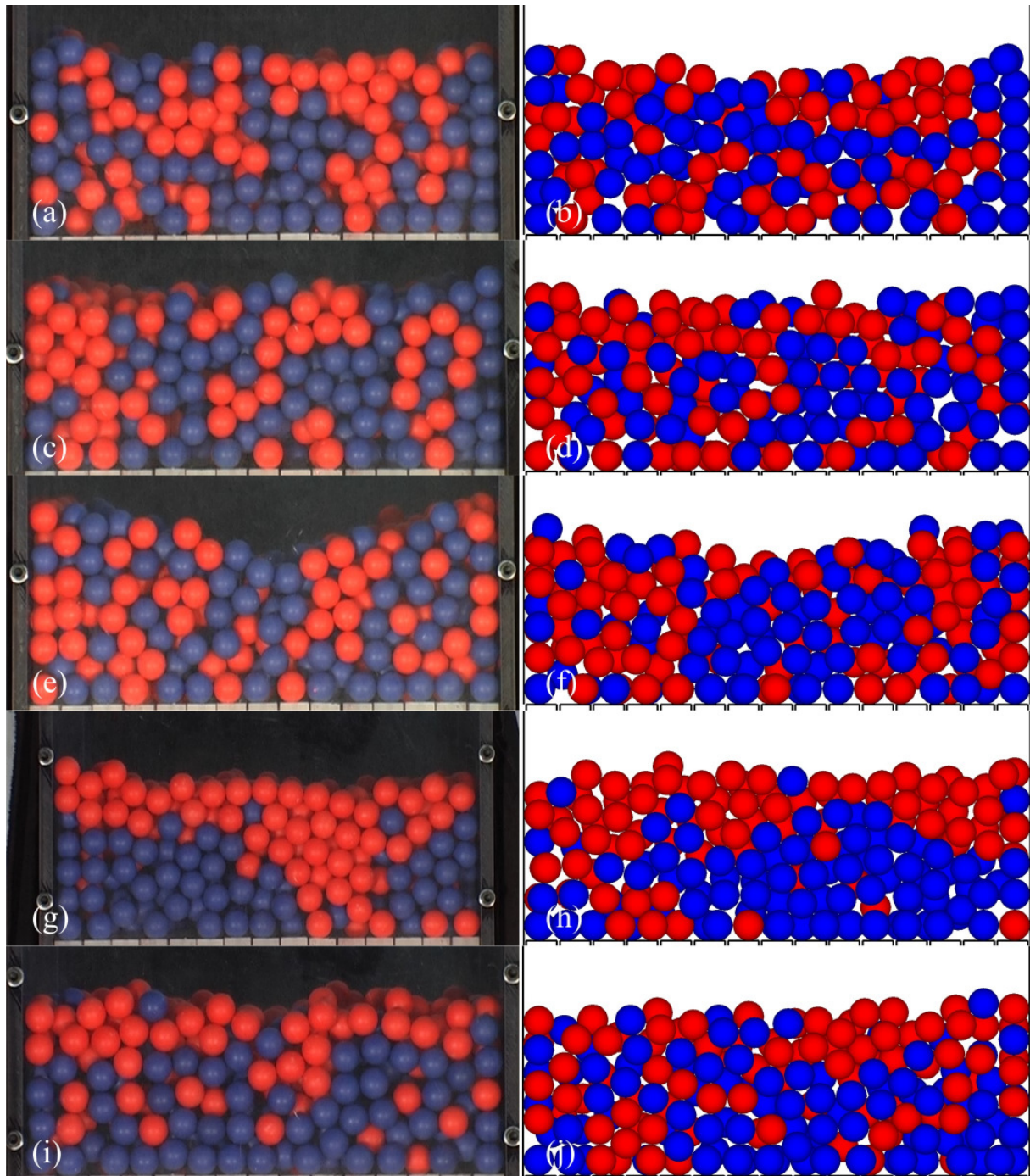
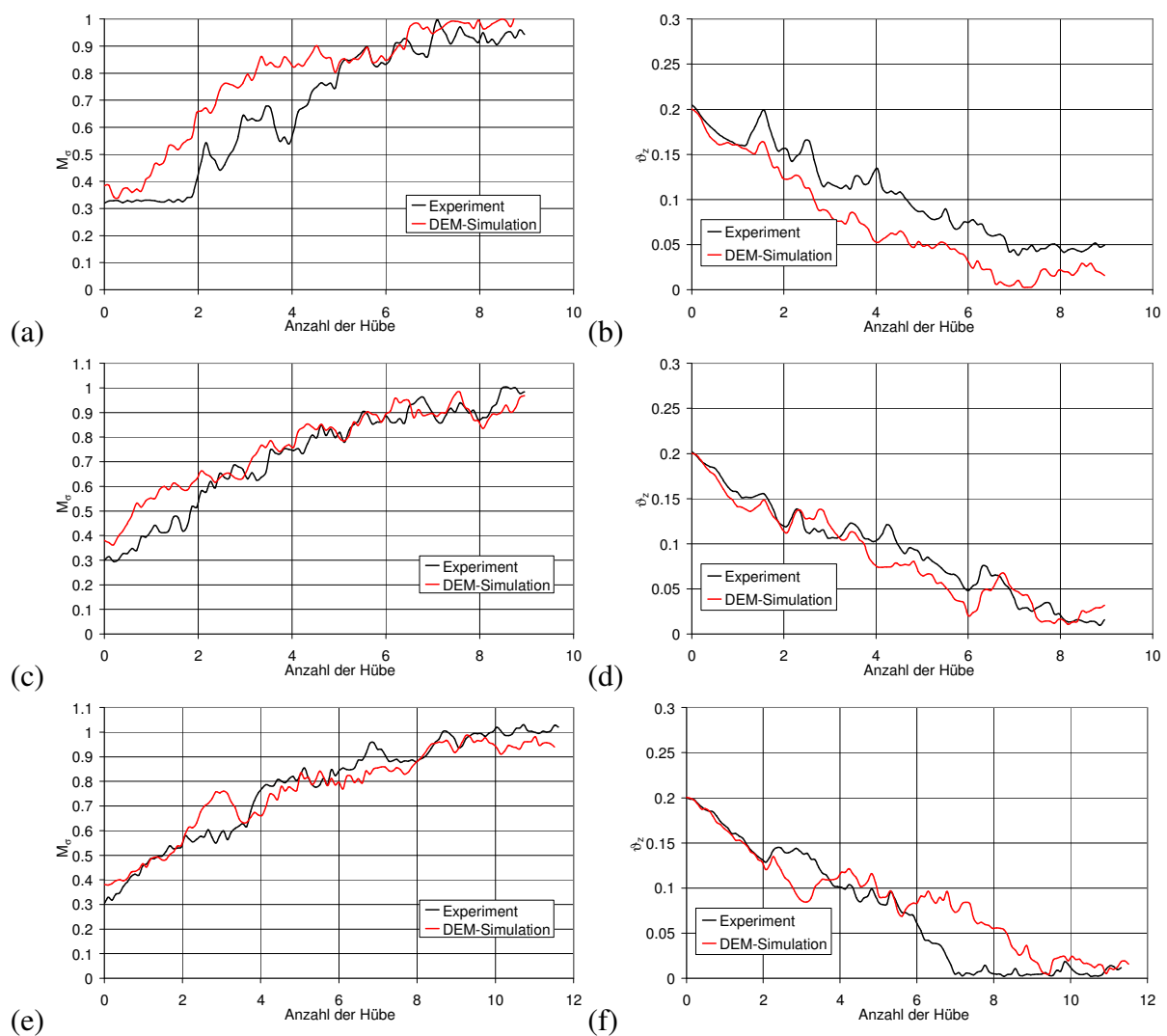


Abbildung 4.25: Endverteilung mit 20 mm Kugeln und 10 cm Hublänge:

Zweigruppen-Modus mit	(a) Experiment, (b) DEM-Simulation
Dreigruppen-Modus mit	(c) Experiment, (d) DEM-Simulation
Wellen-Modus mit	(e) Experiment, (f) DEM-Simulation
Gleichhub-Modus mit	(g) Experiment, (h) DEM-Simulation
Gegenhub-Modus mit	(i) Experiment, (j) DEM-Simulation

Auch bei diesem Vergleich ist rein visuell eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erkennen. Eine Ausnahme stellt der Gleichhub-Modus (Abbildung 4.25 (g, h)) dar. Im Experiment haben sich die beiden Schichten nur sehr wenig vermischt und in der rechten Hälfte gibt es eine Einbruchstelle, an der sich nur rote Kugeln befinden. In der Simulation dagegen wird ein geringfügig höherer Mischungsgrad erreicht und es kommt zu einer Einbruchstelle auf der linken Seite der Schüttung. Dieser Unterschied ist dadurch zu erklären, dass durch Brückenbildungen die gesamte Schüttung mehrfach auf und ab bewegt wird. Anschließend wird an einer zufälligen Stelle die Brücke aufgebrochen und die Partikel fallen nach unten. Dieser Brückenbildungseffekt ist in der Simulation nicht ganz so stark ausgeprägt, da in der Simulation die Partikel der untersten Schicht im Anfangszustand nicht so gleichförmig angeordnet sind wie im Experiment (siehe Abbildung 4.22). Die Mischungsparameter (Abbildung 4.26) bestätigen auch für diese Vergleiche die visuell gewonnenen Eindrücke.



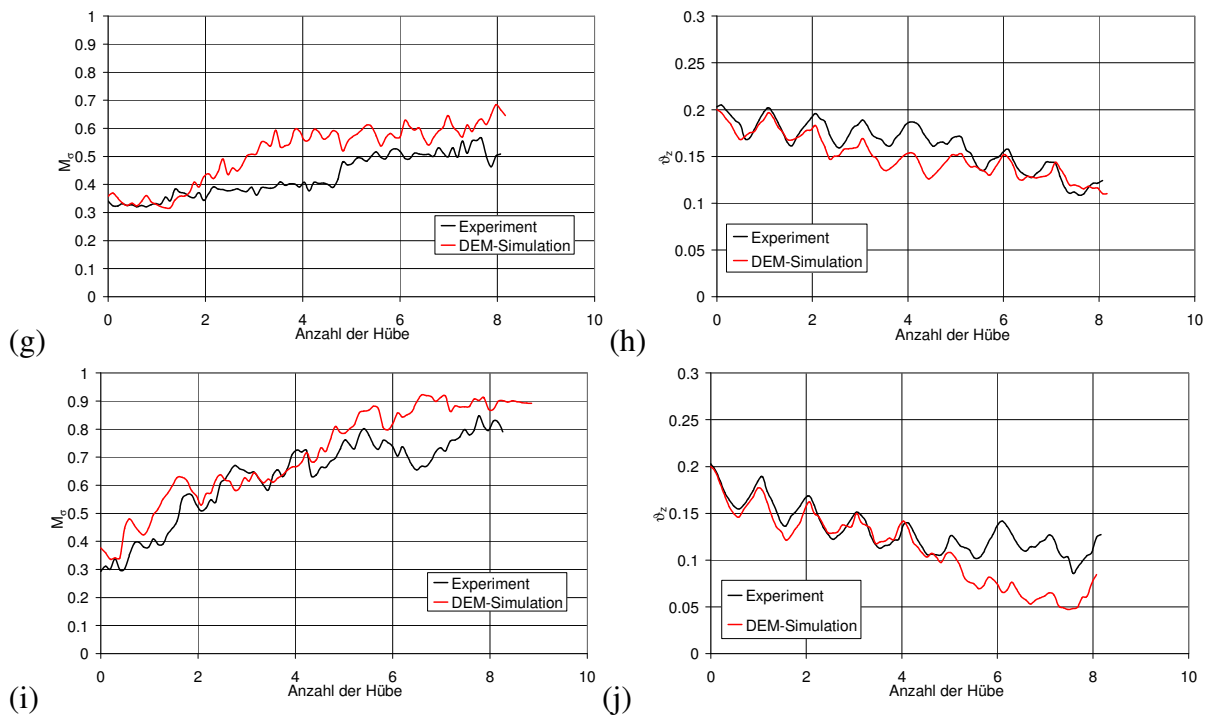


Abbildung 4.26: Vergleich Experiment und Simulation bei 20 mm Kugeln und 10 cm Hublänge: (a) Mischungsindex, (b) Segregationsindex für Zweigruppen-Modus; (c) Mischungsindex, (d) Segregationsindex für Dreigruppen-Modus; (e) Mischungsindex, (f) Segregationsindex für Wellen-Modus; (g) Mischungsindex, (h) Segregationsindex für Gleichhub-Modus; (i) Mischungsindex, (j) Segregationsindex für Gegenhub-Modus

Zusammenfassend zeigen diese Ergebnisse, dass die DEM-Simulationsmethodik sehr gut in der Lage ist, die mechanische Bewegung einer Schüttung zu reproduzieren bzw. vorherzusagen. Wobei anzumerken ist, dass hier eine Schüttung aus homogenen Kugeln mit relativ genau bekannten Materialparametern betrachtet wurde.

4.8 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung am Versuchsstand

Die experimentellen Untersuchungen mit dem an industrielle Schubroste angelehnten Versuchsstand haben deutliche Abhängigkeiten des Mischungszustandes von Geometrie und Betriebsparametern des Rostes sowie der Partikelgröße gezeigt. Dabei wurden Versuchsreihen mit monodispersen Schüttungen aus 5, 10 und 20 mm Kugeln und mit einer polydispersen Schüttung aus wiederum 5, 10 und 20 mm Kugeln unter Variation der Geschwindigkeit, der Hublänge und des Bewegungsmusters der Stäbe durchgeführt. Bei der Variation der Stabgeschwindigkeit hat sich ganz deutlich herausgestellt, dass sie keinen signifikanten Einfluss auf

den Mischungsprozess hat. Die Hublänge der Stäbe dagegen hat einen starken Einfluss auf die Mischung. Bessere Mischungen werden bei größeren Hublängen erreicht. Ein Sättigungseffekt tritt auf, wenn die Hublänge der Schütthöhe entspricht. Der Vergleich der Bewegungsmuster hat deutlich gemacht, dass eine schnelle und effiziente Mischung erreicht wird, wenn die Distanz zwischen zwei gleich bewegten Stäben groß ist. Für industrielle Rostfeuerungen bedeutet dies zum einen, dass durch die Erhöhung der Stabgeschwindigkeit der Massendurchsatz gesteigert wird, es aber kein Einfluss auf die Mischung und Schürung zu erwarten ist und zum anderen, dass durch die Steigerung des Verfahrensweges der Roststäbe mehr Mischung innerhalb der Schüttung erzeugt wird. Des Weiteren ist das Gegenhubprinzip dem Gleichhubprinzip bezüglich einer besseren Vermischung des Müllbetts vorzuziehen, da beim ersteren mehr Abstand zwischen zwei gleich bewegten Stäben vorliegt.

Die unterschiedlichen monodispersen Versuche wurden auch dazu verwendet, den Einfluss des Partikeldurchmessers auf die Mischung zu bewerten. Diese Vergleiche haben gezeigt, dass mit steigendem Kugeldurchmesser die Mischung zunimmt, da bei größeren Kugeln das Einflussgebiet eines bewegten Stabes größer ist und somit mehr Masse bewegt wird.

Der Verlauf der Mischungsparameter der DEM-Simulation im Vergleich mit den entsprechenden Experimenten hat, wie die visuelle Betrachtung, eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment gezeigt. Selbst großräumige Phänomene wie die Verdrehung des Kugelbetts gegen den Uhrzeigersinn im Dreigruppen-Modus, das Heraufwandern der unteren Partikelschichten an den Außenwänden und die symmetrische Anordnung der Farben im Wellen-Modus lassen sich in gleicher Form auch in der DEM-Simulation beobachten. Aufgrund dieses Ergebnisses bietet sich die solchermaßen überprüfte DEM-Simulationstechnik an, um die Mischung in komplexeren Systemen zu untersuchen, für die die Messung und Bewertung der Mischung ungleich schwieriger oder gar nicht möglich ist. Allerdings ist dabei zu beachten, dass sich die Simulationsparameterbestimmung für komplexere Körperformen und inhomogenere Schüttgüter nicht so einfach durchführen lässt wie für die hier verwendeten POM-Kugeln. Daher ist zu erwarten, dass die Simulation unter anderen Randbedingungen (Partikel unterschiedlicher Formen, Größen, Materialien etc.) stärker vom Realverhalten abweicht. Einen qualitative Aussage über die Mischung in Schüttgütern lässt sich mit dem vorhandenen DEM-Simulationsprogramm jedoch auch für komplexere Systeme treffen.

4.9 Rostsimulationen

Bevor im Abschnitt 4.9.2 die Geometrien der simulierten Roste mit den gewählten Randbedingungen und im Abschnitt 4.10 die Ergebnisse der Simulationen präsentiert werden, wird

im Folgenden das zur Approximation des Schüttguts „Hausmüll“ benutzte Adhäsionsmodell kurz beschrieben.

4.9.1 Adhäsionsmodell

Aufgrund der stark unterschiedlichen Geometrien kommt es bei einer realen Rostfeuerung zu einem permanenten Verhaken bzw. Haften der unterschiedlichen Körper des Schüttguts. Dies hat einen großen Einfluss auf das Transportverhalten auf einem Rost.

Bei der DEM-Simulation von Rostsystemen mit Kugeln kommt es zu einem sehr starken Abrollen, wodurch die berechneten Verweilzeiten im Vergleich mit komplex geformten Partikeln deutlich zu klein sind. Dies ist insbesondere bei großen Neigungen, wie es bei industriellen Rückschub- und Walzenrosten der Fall ist, zu beobachten. Aus diesem Grund wurde im Bearbeitungszeitraum von Januar 2007 bis Dezember 2007 die Simulation mit verschiedenen Körperformen am Versuchsstand getestet und der Einfluss der Körperform auf die Mischung gezeigt [30]. Obwohl ein starker Einfluss der Körperform auf die Mischung zu sehen war, haben diese Simulationen deutlich gemacht, dass diese Möglichkeit zur Simulation realer Rostsysteme zuviel Rechenzeit benötigt und dass das Verhaken von Müll mit einfachen Körperformen auch nicht wiedergegeben werden kann.

In dem letzten Bearbeitungszeitraum wurde als neuer Ansatz ein Adhäsionsmodell (angelehnt an Luding [31]) verwendet, wodurch das Verhalten beim Verhaken der verschiedenen Körper vereinfacht abgebildet wird. In diesem Modell (Abbildung 4.27) wird die Kontaktkraft bei dem Stoß zweier Partikel zunächst mit einer Steifigkeit k_1 genau wie in üblichen Kraftmodellen (siehe Abschnitt 4.7.1) bestimmt. Diese so genannte „Beladungsphase“ endet, sobald die maximale virtuelle Überlappung δ_{\max} bzw. die maximale Kraft f_{\max} erreicht ist, d. h. sobald sich die Partikel nicht mehr aufeinander zu bewegen. Anschließend in der „Entladungs-/ Wiederbeladungsphase“ wird eine andere Steifigkeit $k_2 \leq k_1$ verwendet sodass dieser Kontakt in dem kraftfreien Punkt δ_0 endet. In diesem Zustand herrscht keine Kontaktkraft und somit werden diese Partikel nicht beschleunigt, obwohl sie noch im Kontakt stehen. Diese Haftung der Partikel aneinander kann dann nur durch eine äußere Kraft mit einem Mindestwert von $f_{\min} = k_c \cdot \delta_{\min}$ in die „Entladungsphase“ überführt werden, in der die Haftkräfte immer kleiner werden und der Kontakt durch immer kleinere äußere Kräfte gelöst werden kann. Die Berechnungsformeln für die Stoßkraft in den drei Phasen sind in der Gleichung (4.12) gezeigt.

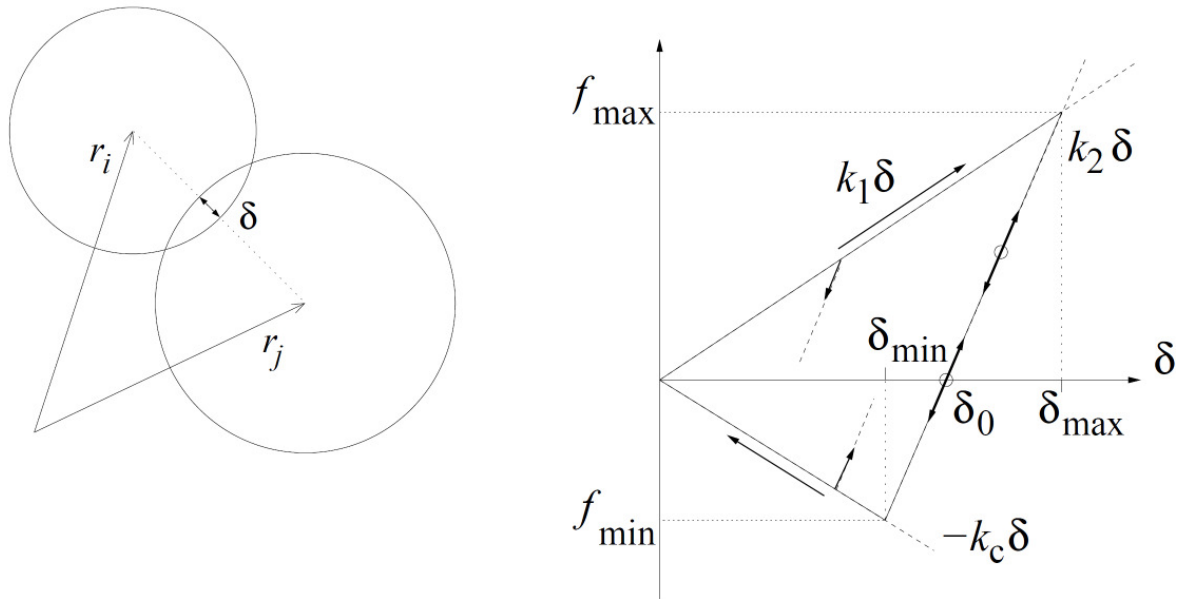


Abbildung 4.27: Prinzip des verwendeten Adhäsionsmodells nach Luding [31]

$$F = \begin{cases} k_1 \delta & \text{Beladung} \\ k_2 (\delta - \delta_0) & \text{Entladung / Wiederbeladung} \\ -k_c \delta & \text{Entladung} \end{cases} \quad (4.12)$$

Durch die Modifikation der drei Steifigkeiten k_1 , k_2 und k_c lässt sich auch mit kugelförmigen Partikeln jeder beliebige aus Versuchen zu ermittelnde statische Schüttwinkel einstellen. Der Einfluss des Adhäsionsmodells ist in der Abbildung 4.28 gut zu erkennen.

Es handelt sich um eine monodisperse Schüttung, die sich zu Beginn der Simulation in einem Zylinder befindet (Abbildung 4.28 (d)). Anschließend wird der Zylinder hochgezogen, sodass sich die Schüttung ausbreiten kann. Die Abbildung 4.28 (a) zeigt das Ergebnis dieser Simulation ohne Adhäsionsmodell. Als Resultat sieht man, dass sich die Kugeln relativ weit ausbreiten und dass sich nahezu kein Haufen bildet. Mit geringer Adhäsion (Abbildung 4.28 (b)) verhält sich die Schüttung schon anders. In diesem Fall rollen die Kugeln nicht mehr so weit auseinander und es bildet sich ein kleiner Haufen. In der letzten Simulation (Abbildung 4.28 (c)) wurde eine starke Adhäsion eingestellt, sodass die Schüttung in einem sehr steilen Schüttwinkel stehen bleibt. Man sieht, dass auch mit Kugeln mit Hilfe des Adhäsionsmodells jeder beliebige Schüttwinkel eingestellt werden kann. Bei den vorliegenden Rostsimulationen wurde für die Partikel ein Schüttwinkel von ca. 40° eingestellt.

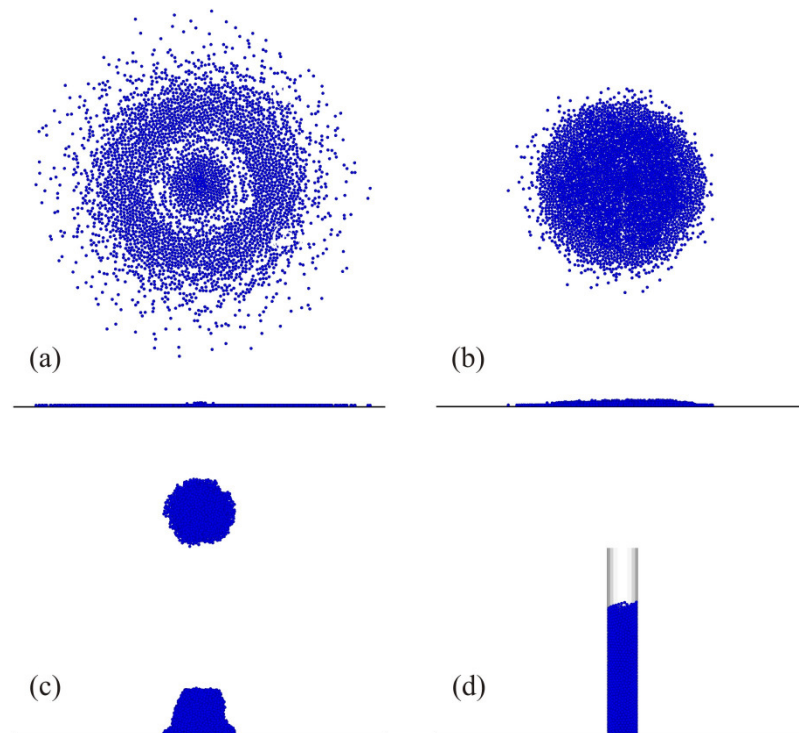


Abbildung 4.28: Einfluss verwendetes Adhäsionsmodells; (a) ohne Adhäsion, (b) geringe Adhäsion, (c) starke Adhäsion, (d) Initialzustand

4.9.2 Rostgeometrien und Randbedingungen

Die untersuchte Vorschubrostgeometrie ist die halbtechnische Versuchsanlage TAMARA des Forschungszentrums Karlsruhe (Abbildung 4.29 (a)). Sie ist ein Vier-Zonen-Rost mit einer Länge von 3,2 m, einer Breite von 0,8 m und einer Neigung von ca. 8° . Der Rückschubrost entspricht einer Pilotanlage des CUTEC-Instituts und wurde durch die Firma MARTIN GmbH für Versuchszwecke installiert (Abbildung 4.29 (b)). Der Rost ist ein 2,6 m langer, 0,6 m breiter und um 26° geneigter Fünf-Zonen-Rost mit einer thermischen Leistung von bis zu 950 kW, der gegenüber Großanlagen zwar verkleinert, aber im Aufbau identisch ist. Der Walzenrost entspricht einer 12,1 m langen, 4,5 m breiten und um 20° geneigten Großanlage der Kreis Weseler Abfallgesellschaft (Abbildung 4.29 (c)). Für eine bessere Vergleichbarkeit und aus Rechenzeitgründen wurde der Walzenrost geometrisch auf eine Länge von 3 m und eine Breite von 0,4 m herunterskaliert und der Vorschub- sowie auch der Rückschubrost wurden ebenfalls nur mit einer Breite von 0,4 m simuliert. Da bei solch einer geringen Breite die Randeffekte einen großen Einfluss haben, wurden alle Roste mit einer „slip-flow“ Randbedingung gerechnet, um die für diese erste Untersuchung zunächst uninteressanten Randeffekte auszuklammern. Durch diese „slip-flow“ Randbedingung wird dafür gesorgt, dass die Partikel

am Rand keine Reibung durch die Außenwände erfahren. Dadurch werden diese Partikel nicht abgebremst und bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Partikel in der Mitte.

Die Schüttung besteht aus Holzhackschnitzeln mit einer Dichte von $\rho=700 \text{ kg/m}^3$, die durch Kugeln approximiert werden. Die Partikelgrößenverteilung besteht aus einer Gleichverteilung von fünf diskreten Durchmessern (36,5 mm Rot, 29,5 mm Gelb, 22,5 mm Grün, 15,5 mm Hellblau und 8,5 mm Blau). In der 3-dimensionalen Simulation des Vorschubrostes befinden sich ca. 13.000 Partikel, beim Rückschubrost sind es ca. 24.000 und beim Walzenrost ca. 33.000.

Die Betriebsparameter der drei Roste sind in der folgenden Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Tabelle 4.4: Betriebsparameter der drei Rosttypen

Vorschubrost				
Bewegte Stabreihen	1, 3, 5	7, 9	11, 13	15, 17
Stabgeschwindigkeit [mm/s]	21,05	20,00	10,81	11,11
Hublänge [mm]	200	200	200	200
Rückschubrost				
Bewegte Stabreihen	1, 3, 5, 7, 9, 11			
Stabgeschwindigkeit [mm/s]	13,33			
Hublänge [mm]	200			
Walzenrost				
Walzen	1, 2, 3, 4, 5, 6			
Walzendrehzahl [°/s]	0,26			

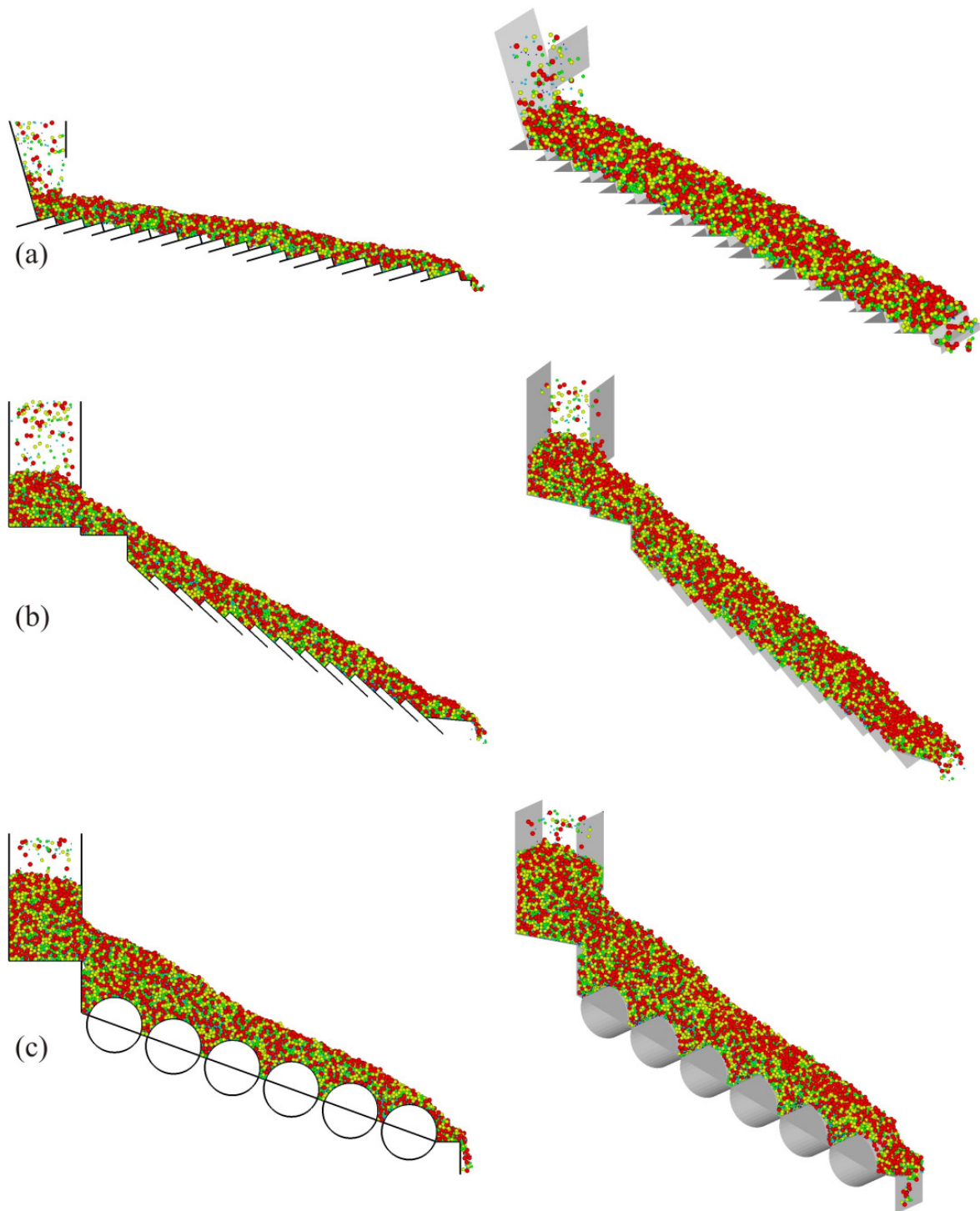


Abbildung 4.29: DEM-Modell des Vorschubrostes (a), des Rückschubrostes (b) und des Walzenrostes (c)

4.10 Ergebnisse der Rostsimulationen

In Abbildung 4.30 sind die Partikel entsprechend ihrer momentanen Verweilzeit auf den Rosten farblich gekennzeichnet. Dabei haben der Vorschub- und der Rückschubrost schon mehr als eine Maximalverweilzeit gefördert, was für den Walzenrost nicht gilt. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Partikel auf dem Walzenrost noch keine gesamte Verweilzeit auf dem Rost befinden. Der Grund dafür ist, dass erst zu einem späteren Zeitpunkt, in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, beschlossen wurde auch einen Walzenrost mit in die Betrachtung und Vergleiche einzubeziehen. Von daher läuft die Simulation des Walzenrostes noch und kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ausgewertet werden, da mindestens ein Durchlauf Voraussetzung für die meisten Auswertungen ist.

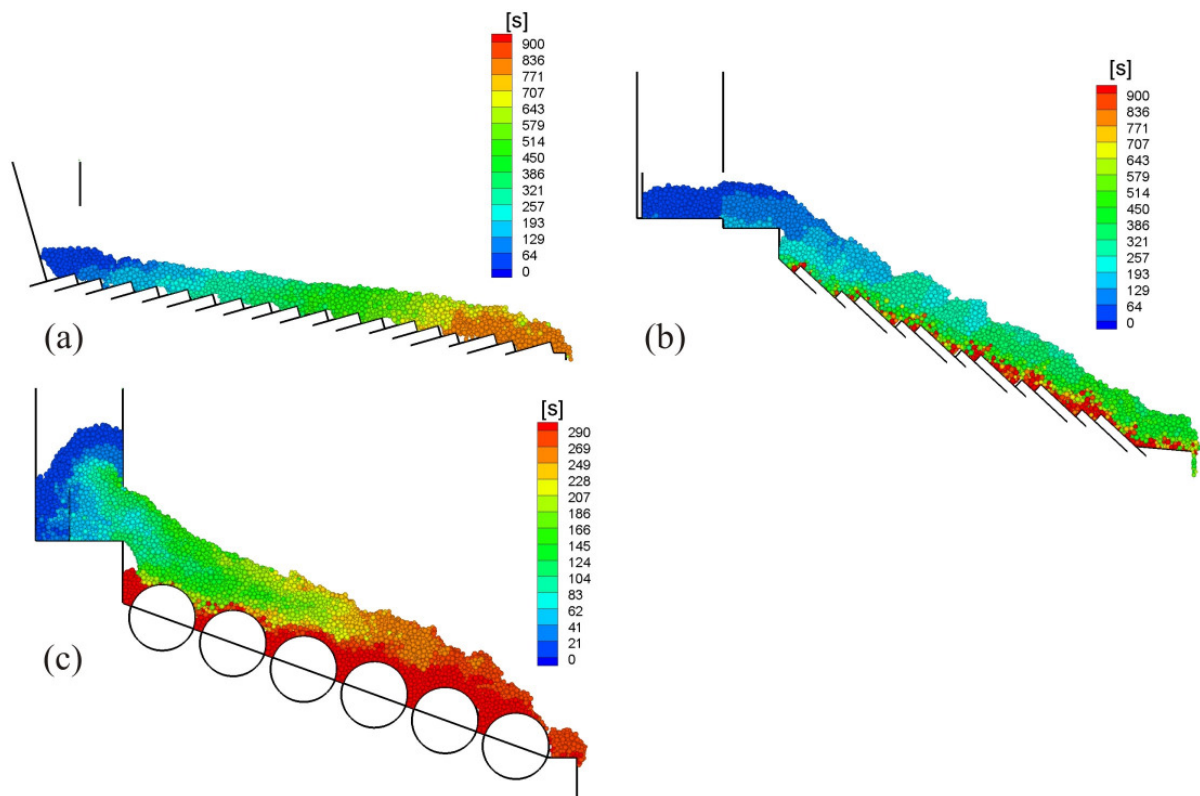


Abbildung 4.30: Partikelverweilzeit des Vorschubrostes (a), des Rückschubrostes (b) und des Walzenrostes (c)

Bei Betrachtung der Partikelverweilzeiten des Vorschubrostes (Abbildung 4.30 (a)) sieht man, dass die Verweilzeit kontinuierlich in Laufrichtung zunimmt und sich nahezu keine Schichtung über die Höhe der Schüttung ergibt. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass die Schüttung relativ gleichmäßig über den Rost transportiert wird. Beim Rückschubrost (Abbildung 4.30 (b)) dagegen erkennt man eine starke Schichtung über die Höhe der Schüttung. Über die gesamte Rostlänge ergibt sich eine Scherzone mit Partikeln, die sich nur sehr

langsam von ihrer Position fortbewegen. Beim Walzenrost (Abbildung 4.30 (c)) ist im jetzigen Zustand schon zu erkennen, dass sich die Partikel in den Zwischenräumen zwischen den Walzen (Zwickeln) sehr lange aufhalten. Im Vergleich des Vorschub- und des Rückschubrostes ist zu sehen, dass die Schüttung auf dem Rückschubrost wesentlich schneller transportiert wird als auf dem Vorschubrost. Der Grund dafür ist die höhere resultierende mittlere Vorschubgeschwindigkeit auf dem Rückschubrost (11 mm/s) im Vergleich mit dem Vorschubrost (5 mm/s) aufgrund der hier eingestellten Betriebsparameter. Auf dem Walzenrost resultiert eine mittlere Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/s.

Die Abbildung 4.31 zeigt die Verweilzeitverteilung des Vorschub- (a) und des Rückschubrostes (b) für jede Partikelgrößenklasse. Beim Vorschubrost resultiert für fast alle Partikel eine Verweilzeit von ca. 840 s bis 920 s. Beim Rückschubrost dagegen ist die Spannweite größer, die meisten Partikel haben eine Verweilzeit von ca. 450 s bis 500 s, es gibt aber auch relativ viele Partikel, die Verweilzeiten von über 600 s bis 900 s besitzen. Der Vergleich zwischen Vorschub- und Rückschubrost zeigt auch bei dieser Betrachtung, dass sich die Partikel auf dem Vorschubrost im Mittel länger aufhalten und gleichmäßiger transportiert werden als auf dem Rückschubrost. Somit belegen diese Diagramme die bereits visuell aus der Partikelverweilzeit über den Rosten (Abbildung 4.30) gewonnen Ergebnisse. Eine zusätzliche Erkenntnis lässt sich aus dem Vergleich der Verweilzeitverteilungen der verschiedenen Größenklassen gewinnen. Es ist eindeutig zu sehen, dass alle Größenklassen die gleiche Verweilzeit auf dem jeweiligen Rost aufweisen, sodass gesagt werden kann, dass die Größe eines Partikels keinen Einfluss auf seine Verweilzeit hat.

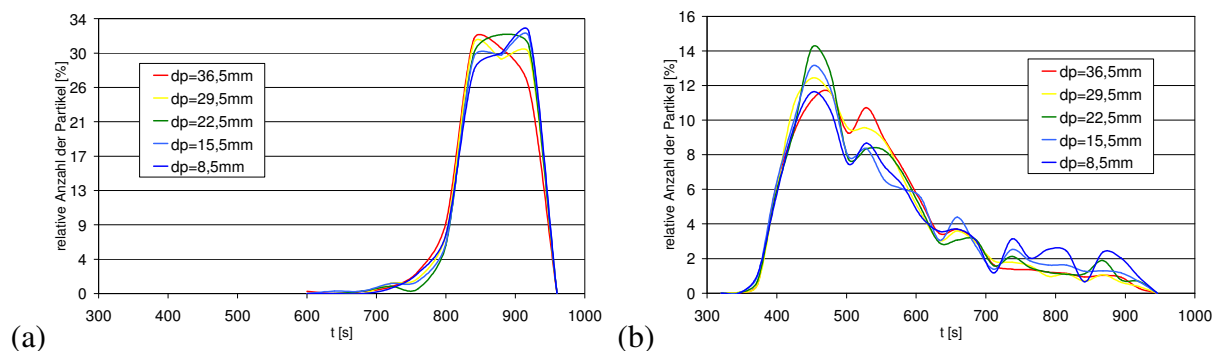


Abbildung 4.31: Verweilzeitverteilung der Partikelgrößenklassen des Vorschubrostes (a) und des Rückschubrostes (b)

Zur Untersuchung der Größensegregation auf den drei Rosttypen wird zunächst die Partikelgrößenverteilung als Klasseneinteilung gewählt. Mit dieser Klasseneinteilung zeigt der Segregationsindex im zeitlichen Verlauf den Zustand der Segregation auf dem gesamten Rost. Umso stärker die Größensegregation, umso größere Werte nimmt der Segregationsindex an. In

Abbildung 4.32 ist der Segregationsindex für den Vorschub- und den Rückschub im Vergleich dargestellt.

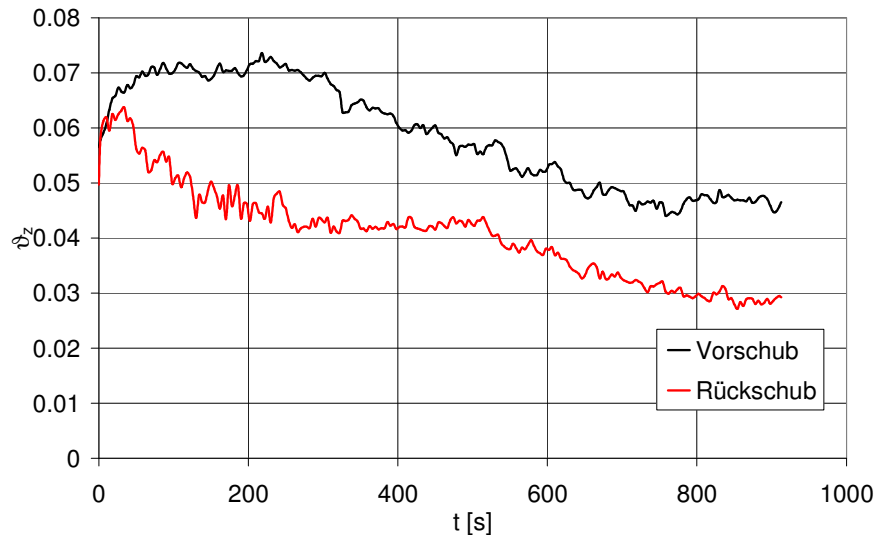


Abbildung 4.32: Segregationsindex für Durchmesserklassen

Es ist zu sehen, dass der Segregationseffekt auf dem Vorschubrost größer ist als auf dem Rückschubrost. Dieses Ergebnis ist dadurch zu erklären, dass kleine Partikel, die durch Lücken zwischen größeren Partikeln aus den oberen in untere Schichten fallen, beim Vorschubrost in den unteren Schichten bleiben, da die Roststäbe die Schüttung nur nach vorne bewegen. Beim Rückschubrost dagegen schieben die Roststäbe die Schüttung gegen die Laufrichtung schräg nach oben und sorgen damit für eine Umwälzung, sodass kleinere Partikel aus unteren Schichten auch wieder in obere Schichten gelangen. Allerdings zeigt das relativ niedrige Niveau des Segregationsindex, dass die Größensegregation kein dominierender Effekt zu sein scheint.

Für eine Analyse der Mischungsvorgänge ist es nötig, eine andere Klasseneinteilung zu wählen. Dafür bietet es sich an, die Partikel geeignet einzufärben. In Abbildung 4.33 (a), (b) und (c) ist gezeigt, wie die Partikel beim Vorschub-, beim Rückschub- und beim Walzenrost an einer bestimmten Stelle des Rostes entsprechend ihrer Höhenposition eingefärbt werden. In allen Fällen werden vier Schichten durch die farbliche Kennzeichnung erzeugt, die unterste Schicht ist blau, dann folgt eine grüne und eine gelbe Schicht, und die oberste Schicht ist rot. Im weiteren Verlauf der Simulation werden alle neu auf die Roste gelangenden Partikel entsprechend ihrer Position in der Schüttung eingefärbt.

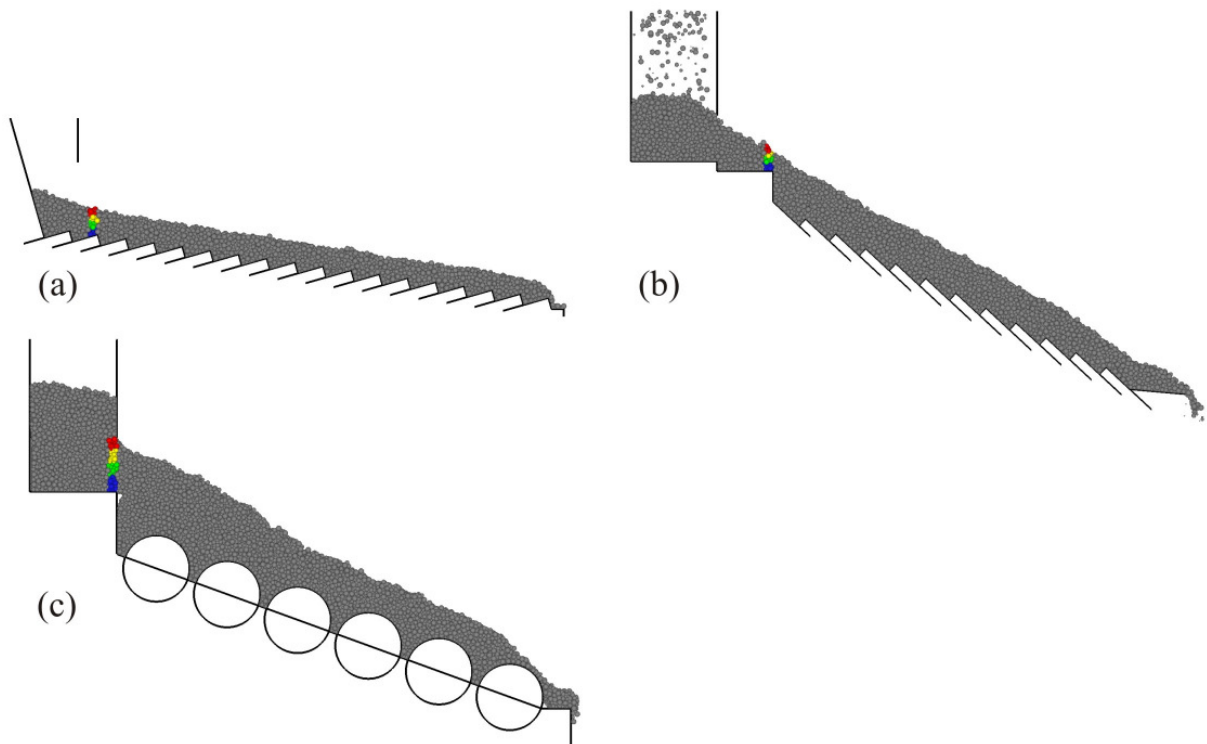


Abbildung 4.33: Vorschub- (a), Rückschub- (b), und Walzenrost (c) mit Einfärbung der Partikel zum Zeitpunkt 0 s

In den folgenden Abbildungen sind Momentaufnahmen der DEM-Simulationen zu verschiedenen Zeitpunkten gezeigt.

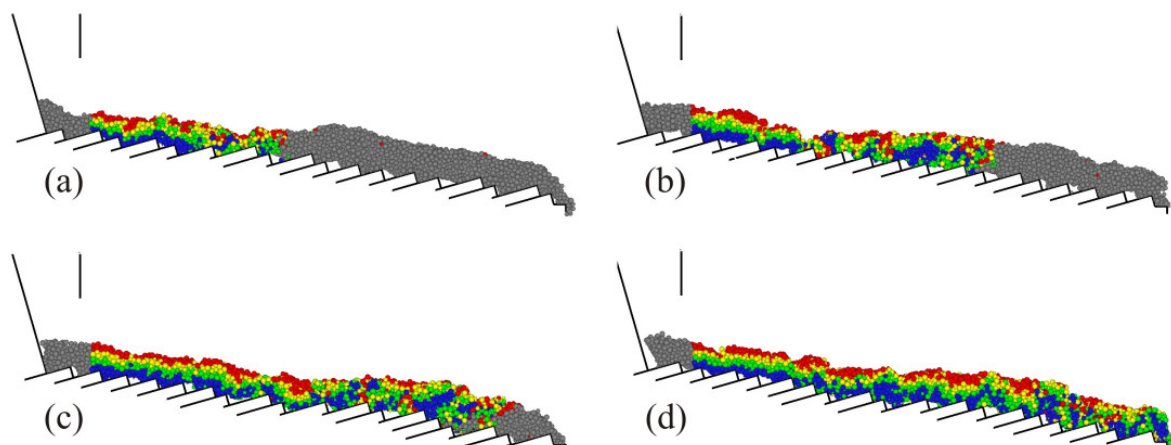


Abbildung 4.34: Momentaufnahme des Vorschubrostes nach (a) 225 s, (b) 450 s, (c) 675 s und (d) 900 s

Beim Vorschubrost (Abbildung 4.34) fällt auf, dass die erzeugten Farbschichten relativ lange bestehen bleiben, bevor eine erste Mischung zu sehen ist. An den gemischten Bereichen erkennt man, dass die Mischung in kleinen lokal begrenzten Umgebungen stattfindet. Beim

Rückschubrost (Abbildung 4.35) bleiben die Farbschichten ebenfalls relativ lange bestehen. Nach Einsetzen der Mischung erkennt man, dass im Gegensatz zum Vorschubrost größere Bereiche der Schüttung als Ganzes umgeschichtet werden, wobei gleichfarbige Gruppen zum größten Teil zusammenbleiben. Des Weiteren lässt sich auch durch diese Betrachtungsweise feststellen, dass der Vorschubrost die gesamte Schüttung kontinuierlicher transportiert als der Rückschubrost, bei dem eine Scherzone im unteren Bereich mit nur langsam geförderten Partikeln entsteht.

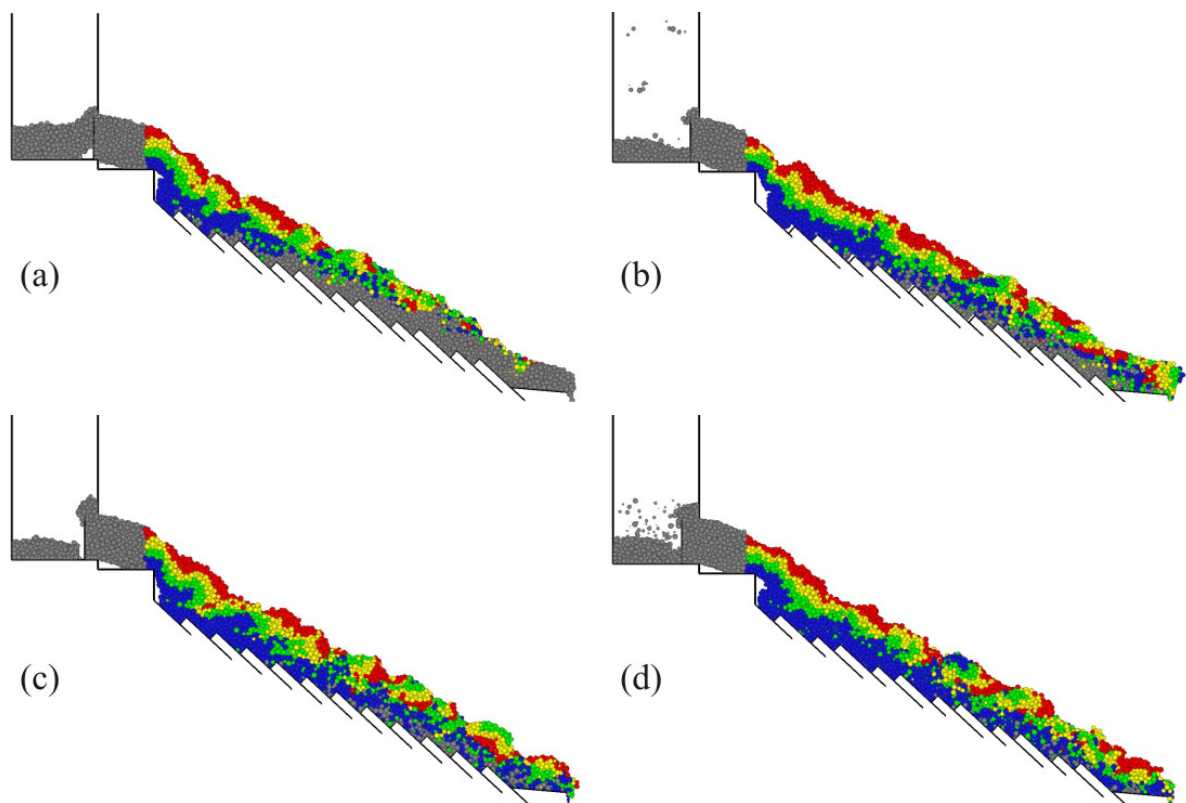


Abbildung 4.35: Momentaufnahme des Rückschubrostes nach (a) 250 s, (b) 500 s, (c) 750 s und (d) 1000 s

Die Momentaufnahmen des Walzenrostes (Abbildung 4.36) zeigen, dass die Farbschichten noch länger als beim Vorschub- und Rückschubrost bestehen bleiben und dass im weiteren Verlauf nur eine mäßige Mischung der Schüttung erzeugt wird. Des Weiteren ist zu sehen, dass der Transport in den unteren Schichten wesentlich langsamer verläuft als in oberen Schichten. Wie stark dieser Effekt tatsächlich ist, wird die Auswertung der Partikelverweilzeit nach einem Durchlauf zeigen.



Abbildung 4.36: Momentaufnahme des Walzenrostes nach (a) 70 s, (b) 140 s, (c) 210 s und (d) 290 s

In der Abbildung 4.37 ist der Mischungsindex basierend auf den erzeugten Farbklassen für den Vorschub- und den Rückschubrost im Vergleich abgebildet. Die Verläufe werden bewusst erst nach 400 s dargestellt, da vor diesem Zeitpunkt für eine statistisch korrekte Auswertung noch nicht genügend farbige Partikel auf den Rosten vorhanden sind.

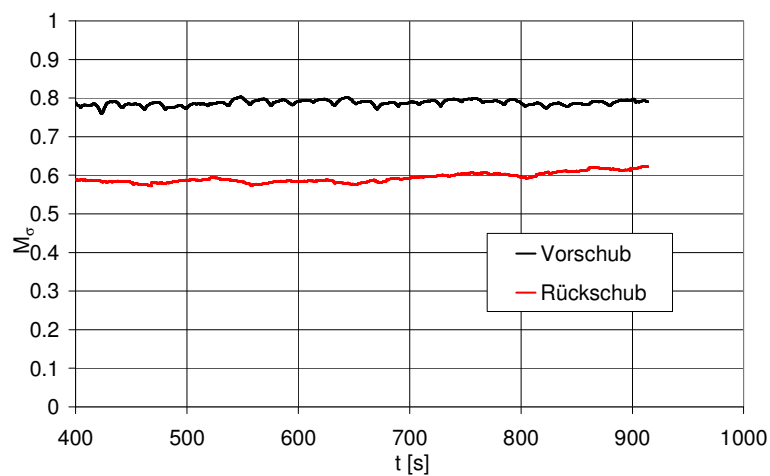


Abbildung 4.37: Mischungsindex für Farbklassen

Es ist zu erkennen, dass für beide Roste ein nahezu quasistationärer Zustand erreicht ist. Beide Verläufe haben nur noch eine marginal steigende Tendenz. Aus dem Vergleich der beiden Verläufe lässt sich feststellen, dass der Vorschubrost einen höheren Mischungszustand erreicht als der Rückschubrost. Wie man aus der Abbildung 4.34 und Abbildung 4.35 gesehen hat, findet die Mischung auf dem Vorschubrost in kleinen lokal begrenzten Bereichen statt, wohingegen auf dem Rückschubrost größere Bereiche der Schüttung als Ganzes umgeschichtet werden und kleine gleichfarbige Gruppen von Partikeln zusammenbleiben. Da der Mischungsindex durch kleine lokale Proben berechnet wird und somit Mischung auf kleinen Skalen detektiert, zeigt er für den Vorschubrost einen höheren Mischungszustand an.

Weitere Erkenntnisse lassen sich durch die Betrachtung der Verweilzeitverteilung der verschiedenen Partikelfarbklassen Abbildung 4.38 gewinnen. Sowohl beim Vorschub- als auch beim Rückschubrost resultieren umso höhere Verweilzeiten, je tiefer die jeweilige Farbschicht zu Beginn in der Schüttung ist. Die blauen Partikel, zu Beginn ganz unten, haben in beiden Fällen die längsten Verweilzeiten und die roten Partikel, zu Beginn ganz oben, haben die kürzesten Verweilzeiten. Die gelben und grünen Partikel liegen mit ihrer Verweilzeit dazwischen. Auffällig ist, dass beim Rückschubrost die blauen Partikel eine sehr breite Verweilzeitverteilung aufweisen, was wiederum ein Beweis dafür ist, dass die Partikel in unteren Schichten beim Rückschubrost teilweise nur sehr langsam gefördert werden. Die Verweilzeitverteilungen der anderen Partikelfarbschichten sind dagegen nicht nennenswert breiter als die des Vorschubrostes, was darauf hindeutet, dass diese Partikel ebenfalls relativ kontinuierlich gefördert werden.

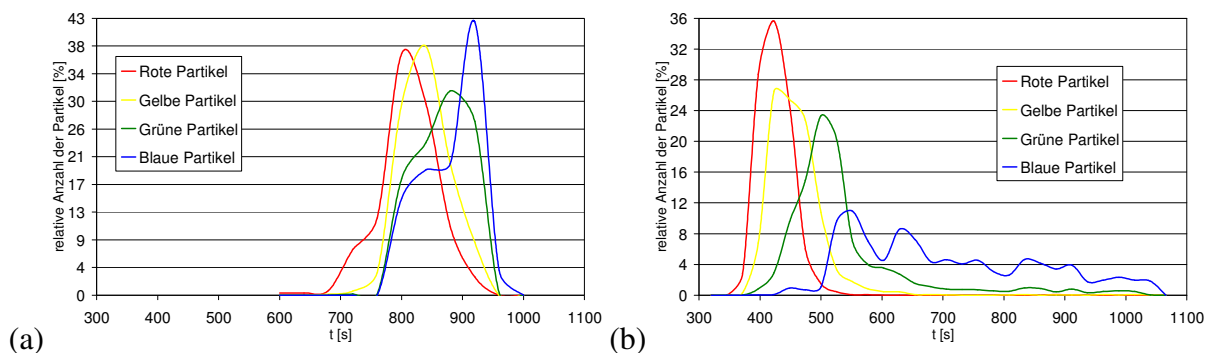


Abbildung 4.38: Verweilzeitverteilung der Partikelfarbklassen des Vorschubrostes (a) und des Rückschubrostes (b)

Zur Überprüfung und zum Vergleich der Transportwirkung des Vorschub- und des Rückschubrostes wird ein Transportwirkungsgrad μ_{Tr} eingeführt. Darin wird der resultierende Volumenstrom der Partikel $\dot{V}_{Partikel}$ zu dem durch die bewegten Stäbe erzeugten Volumenstrom $\dot{V}_{Stäbe}$ ins Verhältnis gesetzt:

$$\mu_{Tr} = \frac{\dot{V}_{Partikel}}{\dot{V}_{Stäbe}} = \frac{\dot{m}_{Partikel} / \rho_{Schüttung}}{\sum_{i=1}^{n_{Bewegt}} v_i \cdot A_i} \quad (4.13)$$

Mit einem Massenstrom der Partikel von $\dot{m}_{Partikel} = 370,39 \text{ kg/h}$, einer Stirnfläche der bewegten Stäbe von $A_i = 0,03 \text{ m}^2$, den in Tabelle 4.4 zusammengefassten Stabgeschwindigkeiten und einer Schüttdichte von $\rho_{Schüttung} = 407,73 \text{ kg/m}^3$ resultiert für den Vorschubrost ein Transportwirkungsgrad von $\mu_{Tr} = 0,114$. Beim Rückschubrost ergibt sich der Transportwirkungsgrad zu $\mu_{Tr} = 0,375$, wobei der Massenstrom der Partikel $\dot{m}_{Partikel} = 996,02 \text{ kg/h}$ und die Stirnfläche der bewegten Stäbe $A_i = 0,025 \text{ m}^2$ beträgt. Damit ist der Transportwirkungsgrad des Rückschubrostes ca. 3-mal so groß wie der des Vorschubrostes, da beim Rückschubrost ein großer Teil des Transportes bzw. der Bewegung der Partikel durch die hohe Neigung entsteht.

In Kontinuumsmodellen zur Beschreibung des Abbrands der Brennstoffschüttung auf einem Rost müssen die wichtigen Transport- und Schürprozesse des Müllbetts durch den Massenstrom und die Schürrate vorgegeben werden. Wobei die Schürrate γ (Gleichung (4.14)) das Verhältnis zwischen dem Schürmassenstrom \dot{m}_S , d. h. dem Massenstrom der quer zur Lauflänge zwischen oberen und unteren Schichten ausgetauscht wird und dem Gesamtmassenstrom \dot{m}_G ist. Des Weiteren unterliegt die Schürrate großen Schwankungen entlang des Rostes.

$$\gamma = \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_G} \quad (4.14)$$

Da die experimentelle Bestimmung der Schürrate nicht oder nur mit erheblichem Aufwand möglich ist, wurde sie bisher rein aus optischen Beobachtungen und Erfahrungen abgeleitet. Die durchgeführten DEM-Simulationen ermöglichen dagegen die relativ einfache Bestimmung der Schürrate in Abhängigkeit der Position auf dem Rost, sodass dies in Kontinuumsmodellen genutzt werden kann. In der Abbildung 4.39 sind die Schürratenverläufe für alle drei Rostsimulationen abgebildet.

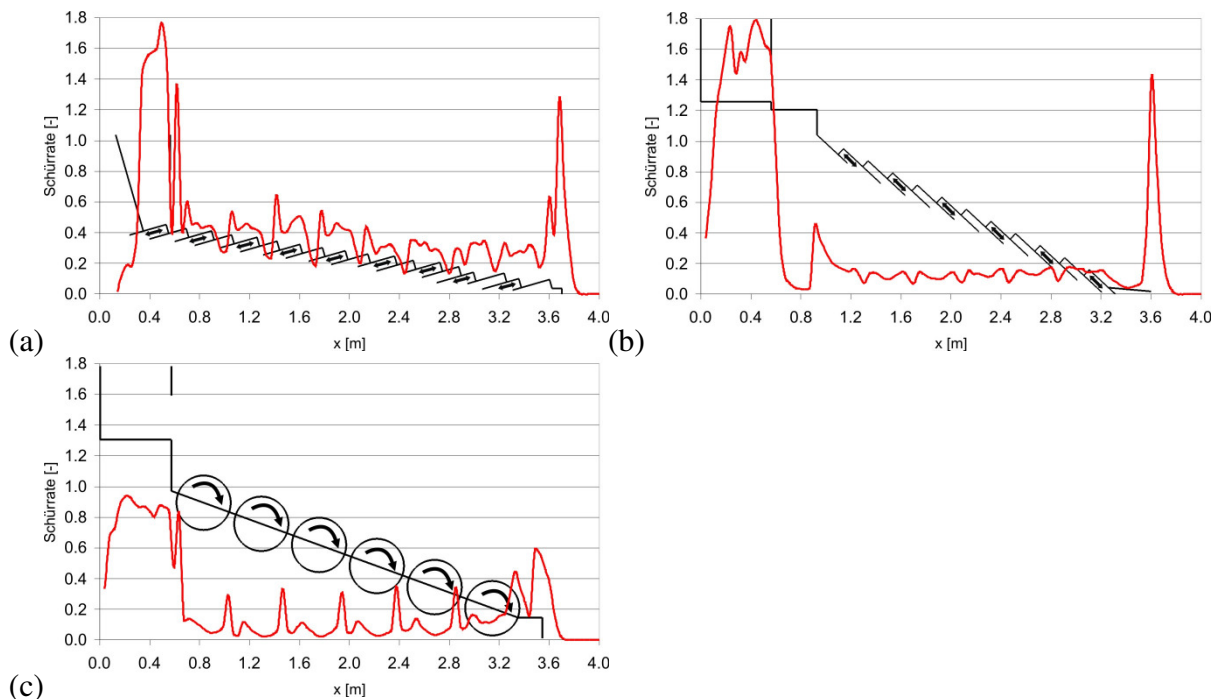


Abbildung 4.39: Schürrenverläufe für (a) Vorschub-, (b) Rückschub- und (c) Walzenrost

In allen drei Fällen kommt es im Aufgabe- und Austragsschacht zu einem extremen Anstieg der Schürrenrate, da hier durch die senkrecht fallenden Partikel ein hoher Quermassenstrom entsteht. Entlang der Roste sieht man einen charakteristischen Verlauf der Schürrenrate. Beim Vorschubrost (Abbildung 4.39 (a)) gibt es ein Maximum an der Kante stehender Stäbe, über die gesamte Länge bewegter Stäbe ist die Schürrenrate auch noch relativ hoch und fällt dann über stehenden Stäben wieder ab. Beim Rückschubrost (Abbildung 4.39 (b)) ist die Schürrenrate generell auf einem niedrigeren Niveau, da die Umschichtung größere Bereiche des Müllbetts länger dauert, als das Mischen kleiner Bereiche auf dem Vorschubrost und daraus weniger Schürrenmassenstrom pro Zeiteinheit resultiert. Der Verlauf zeigt vor jeder Kante unbewegter Stäbe ein Minimum, danach steigt die Schürrenrate leicht an und hält dieses Niveau bis zur nächsten stehenden Kante. Die Schürrenrate über dem Walzenrost (Abbildung 4.39 (c)) ist auf einem ähnlichen Niveau wie beim Rückschubrost und damit ebenfalls geringer als beim Vorschubrost. Ein hoher aber sehr kurzer Anstieg der Schürrenrate entsteht beim Walzenrost immer beim Übergang von Walze zu Zwickel zwischen den Walzen, anschließend kommt es noch mal zu einem leichten Anstieg beim Übergang von Zwickel zu Walze. Über den Walzen existiert ein sehr niedriges Niveau der Schürrenrate.

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Modellierung der Wärme- und Stoffübertragung zwischen Feststoff und Gasphase ist neben der Schürrenrate die Lückengradsverteilung des Brennstoffbetts. Diese lässt sich ebenfalls aus den durchgeführten DEM-Simulationen ableiten und

in Kontinuumsmodellen als Randbedingung verwenden. Aus den hier durchgeführten Rostsimulationen ergeben sich die in Abbildung 4.40 dargestellten Lückengradsverteilungen.

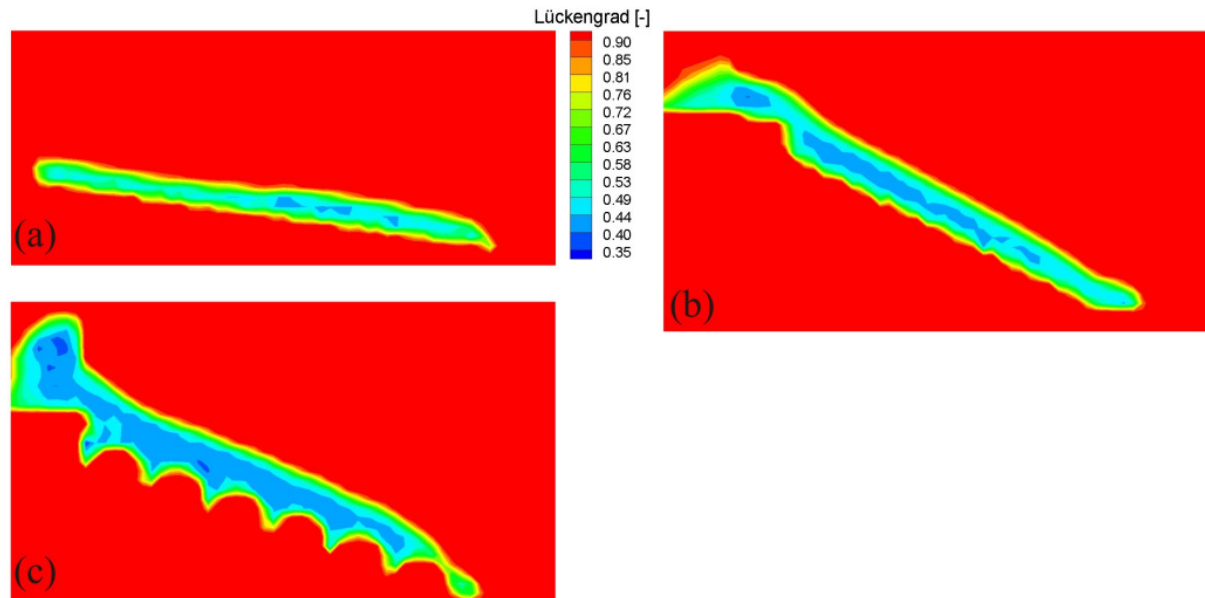


Abbildung 4.40: Lückengradverteilung für (a) Vorschub-, (b) Rückschub- und (c) Walzenrost

Beim Vorschubrost (Abbildung 4.40 (a)) sieht man, dass im Gegensatz zum Rückschubrost (Abbildung 4.40 (b)) und Walzenrost (Abbildung 4.40 (c)) nur geringe Teile des Müllbetts einen für eine dichte Packung typischen Lückengrad von 0,35 bis 0,4 aufweisen, die meisten Bereiche liegen darüber mit Werten von bis zu 0,8. Beim Rückschub- und beim Walzenrost sind aufgrund der höheren Schütthöhe die größten Bereiche des Müllbetts dichter und damit ist der Lückengrad an diesen Stellen auch klein mit Werten von 0,35 bis 0,4.

4.11 Zusammenfassung der Rostsimulationen

Die durchgeführten Simulationen und Untersuchungen der drei verschiedenen Rosttypen haben mehrere für die Praxis relevante Ergebnisse geliefert. Die untersuchte Vorschubrostgeometrie ist die halbtechnische Anlage TAMARA des Forschungszentrums Karlsruhe, der Rückschubrost entspricht einer Pilotanlage des CUTEC-Instituts, installiert durch die MARTIN GmbH. Beide Roste sind gegenüber Großanlagen zwar verkleinert, aber im Aufbau identisch. Der Walzenrost entspricht einer Abfallverbrennungsanlage der Kreis Weseler Abfallgesellschaft und wurde zur besseren Vergleichbarkeit auf geometrisch ähnliche Abmaße wie der Vorschub- und der Rückschubrost skaliert.

Alle durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass der Vorschubrost die Schüttung gleichmäßiger transportiert als der Rückschubrost. Wobei in beiden Fällen die Verweilzeit der Partikel

mit steigender anfänglicher Tiefe innerhalb der Schüttung zunimmt. Beim Rückschubrost entsteht eine Scherzone im unteren Bereich der Schüttung innerhalb derer sich die Partikel nur sehr langsam in Laufrichtung bewegen. Aus diesem Grund resultiert für die unteren (blauen) Partikel eine sehr breite Verweilzeitverteilung. Die darüberliegenden Partikelschichten dagegen haben auch beim Rückschubrost eine ähnlich breite Verweilzeitverteilung wie die Partikel auf dem Vorschubrost und werden damit ebenfalls relativ kontinuierlich gefördert. Die Simulation des Walzenrostes hat gezeigt, dass auch hier die unteren Schichten der Schüttung nur sehr langsam transportiert werden. Die Betrachtung der Verweilzeitverteilung der verschiedenen Partikelgrößenklassen hat eindeutig gezeigt, dass die Größe eines Partikels keinen Einfluss auf die Verweilzeit auf dem Rost hat.

Der Vergleich des Segregationseffektes auf dem Vorschub- und Rückschubrost hat belegt, dass dieser auf dem Vorschubrost größer ist als auf dem Rückschubrost. Der Grund dafür ist, dass auf dem Rückschubrost kleine Partikel, die durch Lücken in untere Schichten gefallen sind, durch die Stabbewegung im Gegensatz zum Vorschubrost wieder in obere Schichten gefördert werden. Wobei die Größensegregation aufgrund des Verhackens der Partikel, in der Simulation durch die Adhäsion abgebildet, kein dominierender Effekt zu sein scheint.

Das Einfärben der Partikel entsprechend ihrer Höhenposition zu Beginn des Rostes liefert neben der Aussage über die Verweilzeiten der unterschiedlichen Schichten auch Aussagen über den Mischungsverlauf auf den Rosten. Rein visuell wurde für alle drei Rosttypen festgestellt, dass die erzeugten Farbschichten relativ lange bestehen bleiben, bevor eine erste Mischung zu sehen ist. Dabei mischt der Vorschubrost primär kleine lokal begrenzte Bereiche, wohingegen der Rückschubrost größere Bereiche als Ganzes umschichtet. Der Walzenrost dagegen induziert nur eine geringe Mischung innerhalb der Schüttung.

Zur Überprüfung und zum Vergleich der Transportwirkung des Vorschub- und des Rückschubrostes wurde ein Transportwirkungsgrad μ_{Tr} eingeführt, der den resultierenden Partikelvolumenstrom zum durch die bewegten Stäbe erzeugten Volumenstrom ins Verhältnis setzt. Bei den hier betrachteten Systemen hat sich herausgestellt, dass der Transportwirkungsgrad des Rückschubrostes 3-mal größer ist als der des Vorschubrostes. Dieser große Unterschied im Transportwirkungsgrad lässt sich damit begründen, dass beim Rückschubrost ein großer Teil der Vorwärtsbewegung der Partikel durch die hohe Rostneigung verursacht wird.

Um die Ergebnisse der Rostsimulationen in Kontinuumsmodellen nutzen zu können, wurden der Gesamtmassenstrom, der Verlauf der Schürtrate über den Rosten sowie die Lückengradsverteilung bestimmt. Diese für die Transport- und Mischungsprozesse wichtigen Parameter können direkt die bisher meist aus Erfahrungswerten gewonnenen Daten innerhalb von Kontinuumsmodellen ersetzen.

5 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas für kleine und mittlere Unternehmen (kmU)

Bioenergie ist in Deutschland ein Wachstumsmarkt. Während im Jahr 2002 die Biomasse einen Betrag von 3,5% zur Wärmebereitstellung und 1% zur Bruttostromerzeugung beisteuerte, geht das Bundesministerium für Umwelt langfristig von einem Potenzial von 10% der Stromversorgung und 20% der Wärmeversorgung aus [17]. Der Bundesverband für Bioenergie sieht ein Umsatzvolumen von 6 Milliarden € der Bioenergiebranche in 2005 und eine Beschäftigtenzahl von ca. 57.000 [18]. Hervorzuheben ist, dass in Deutschland die biogene Wärme- und Strombereitstellung zu ca. 86% aus festen Brennstoffen erfolgt und lediglich 14% auf flüssige und gasförmige Bioenergieträger entfallen. Auch Prognosen für die Zukunft weisen den festen Brennstoffen das höchste Potenzial zu, was die wirtschaftliche Bedeutung dieses stark durch KMU geprägten Bereichs auch künftig sichern wird [19].

Die Anforderungen an die Hersteller und Betreiber von rostgefeuerten Anlagen hinsichtlich der Feinstaub- und Schadstoffemissionen, des Brennstoffausbrands, der Betriebssicherheit und Wartungskosten sowie der generellen Anlagenperformance werden weiterhin steigen. Hierdurch wird ein deutlich über den aktuellen Stand des Wissens hinausgehendes Verständnis der Detailvorgänge auf den Rosten, deren Wechselwirkungen untereinander und mit der sich anschließenden Feuerung immer drängender. Der europaweite Wettbewerb, die aus der Staubemissionsproblematik resultierenden Anforderungen sowie die kurz- bis mittelfristig zu erwartenden Neubauten (sowohl großer zentraler als auch kleiner dezentraler Anlagen) verstärken diesen Druck.

Noch sind im Bereich der Abfallverbrennung wichtige Hersteller von Verbrennungsrosten mittelständische Unternehmen. Daneben lassen sich die zu größeren Konzernen gehörenden Anlagenbauer häufig in Detailfragen von kleineren Unternehmen beraten. Dabei ist gerade die Auslegung von Anlagenkomponenten eine zunehmend an Ingenieurbüros ausgelagerte Tätigkeit.

Im Bereich der thermischen Nutzung von Biomassen (z.B. Pelletfeuerungen) ist diese Situation noch drastischer, hier werden die Systeme oft von sehr kleinen Herstellern entwickelt, hergestellt und häufig auch betrieben (Kaltschmitt [20] weist mehr als 100 Hersteller alleine von Holzfeuerungsanlagen aus, in [21] sind neben ausländischen Herstellern über zwanzig kleinere deutsche Hersteller von Holzpelletkesseln angeführt). Gerade beim Betrieb solcher dezentralen Systeme dominieren die kleinen und mittleren Unternehmen.

Die (finanziell und zunehmend auch personell) begrenzten Forschungsmöglichkeiten kleinerer und mittlerer Unternehmen in Deutschland gestatten jedoch nur in sehr begrenztem Um-

fang die systematische Weiterentwicklung der häufig auf rein empirischer Basis entstandenen Systeme. Gerade für Anlagen zur dezentralen thermischen Nutzung von Biomassen besteht zudem ein großer Bedarf langwierige, oft durch die mechanischen Eigenschaften des Brennstoffs hervorgerufene Probleme zu vermeiden, um so kostenträchtige Inbetriebnahmephase beim Kunden abzukürzen. In diesem Bereich ist zudem am ehesten mit einem direkten Einsatz der Erkenntnisse zu rechnen, da der Aufwand relativ gering ist (kleine Partikelzahlen, reale Geometrie kostengünstig berechenbar) und die Brennstoffcharakterisierung vergleichsweise einfach ist. Durch die größere Anzahl von kleinen Unternehmen ist hier auch mit einer Breitenwirkung zu rechnen, durch welche die Stellung dieser Unternehmen im europäischen Markt insgesamt gefestigt wird.

5.1 Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Zunächst ist eine qualitative und quantitative Vertiefung des Verständnisses von Detailvorgängen auf Rostsystemen von generellem Nutzen für alle Bereiche der Energieverfahrens- und Energieprozesstechnik, in denen stückige, als granulare Medien zu behandelnde Feststoffe transportiert, gemischt, mechanisch bzw. thermisch behandelt oder umgewandelt werden.

Darüber hinaus ist ein sehr kurzfristiger Einsatz der Erkenntnisse im Bereich der Abfallverbrennungsanlagen sicher. Hier existieren verschiedene Kontinuumsmodelle, bei denen die unsichersten Randbedingungen die Mischungs- und Transportwirkungsgrade für konkrete Rostbauformen und Betriebsbedingungen sind. Diese Größen können als Funktion von Rostgeometrie, Brennstoffeigenschaften und Betriebsparametern direkt aus den DEM-Rechnungen abgeleitet werden und in die Kontinuumsmodelle einfließen.

Die vorhandenen Kontinuumsmodelle sind bisher meist für größere Rostsysteme und Versuchsanlagen eingesetzt worden, ihre Anwendung auf kleine Rostfeuerungs-systeme ist wegen der fehlenden, für abnehmende Anlagengrößen aber immer entscheidender werdenden Mischungs- und Transportinformationen unterblieben (eine sinnvolle räumliche und zeitliche Mittelwertbildung umfasst dabei immer weniger „Partikel“). Durch die Vorbildfunktion und Verbreitung der bisherigen Erfahrungen mit dieser Art von Modellen im projektbegleitenden Ausschuss wird ein breiterer Einsatz solcher Programme (zumal günstig verfügbar und problemlos auf Workstations einzusetzen) insbesondere bei kleineren Unternehmen gefördert.

Durch die Verfügbarkeit konkreter Partikelbahn- und Verweilzeitzusammenhänge ist hier auch mit der Entwicklung einer neuen Klasse von Modellansätzen zu rechnen, die diese Informationen direkt, z. B. in kommerziellen CFD-Codes [22], nutzen.

Auch in anderen Bereichen der mechanischen Verfahrenstechnik und Fördertechnik (konkret z. B. Schubbodenlager für Biomassen/Ersatzbrennstoffe) wird ein Nutzen erwartet, da die beantragten Projekt untersuchten Grundvorgänge von Transport und Mischung auch dort von großer Bedeutung sind.

In Zusammenstellung des projektbegleitenden Ausschusses sind größere, mittlere und kleine Unternehmen vertreten. Die Mischung aus Ingenieurbüros (Hestia Service, Seeger Engineering, RSP), Hersteller (Nolting Holzfeuerungsstechnik, Kablitz, KVT-Mifeu, Lentjes, Martin) und Betreiber (EnBW, Kreis Wesel Abfallgesellschaft, Weghaus) spiegelt in ausgewogener und exemplarischer Form den potenziellen Nutzerkreis der Ergebnisse wider. Die Querinformation wird durch die Einbindung des VGB PowerTech e.V. und hier speziell durch die Fachgremien "Thermische Abfallverwertung" sowie "Biomasse" sichergestellt. Dadurch wird über die eigentlichen Projektziele hinaus ein breiter, vorwettbewerblicher Informations- und Gedankenaustausch initiiert, sowie eine Plattform zu einer alle Unternehmen gleichermaßen betreffenden Problematik geschaffen.

5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der kleinen und mittleren Unternehmen (kmU)

Der aufgrund weiter steigender Primärenergiekosten zunehmende Einsatz von Sekundärbrennstoffen und festen Biomassen zur dezentralen Energienutzung sowie die zu erwartenden künftigen Anforderungen an die Emissionsgrenzwerte (Staub, PAK) und Ausbrandgüte von Rostsystemen zur Biomasse- und Abfallverbrennung sind Marktherausforderungen, denen sich die deutschen Hersteller und Betreiber stellen müssen, um im europa- oder weltweiten Wettbewerb bestehen zu können.

Vor allem bei den kleinen und mittleren Unternehmen wird der Spielraum für empirische Entwicklungsarbeiten an laufenden oder in der Inbetriebnahme beim Kunden befindlicher Systeme immer enger. Gleichzeitig sind nur selten die finanziellen und vor allem personellen Ressourcen für den Einsatz aufwendiger numerischer Verfahren vorhanden. Hier kann, gerade auch wegen der Vielzahl zu variierender Größen, die Durchführung grundlegender und verallgemeinerbarer Untersuchungen an Forschungseinrichtungen schnell zu einer Steigerung der Leistungs- und damit auch Wettbewerbsfähigkeit führen.

Zudem wird dadurch die Zahl notwendiger empirischer Untersuchungen verringert, was die Entwicklungskosten und das Entwicklungsrisiko vermindert und gleichzeitig die Chancen für einen wirtschaftlichen Erfolg neuer Konzepte verbessert.

Auch eröffnet die generelle Weiterentwicklung des Wissens durch den Einsatz numerischer Methoden in diesem bisher hauptsächlich empirisch bearbeiteten Bereich wichtige Optionen zur Entwicklung neuer Lösungsansätze mit den daraus resultierenden wirtschaftlichen Erfolgsaussichten.

Letztendlich dokumentiert auch das große Interesse eines breiten Spektrums von Unternehmen am projektbegleitenden Ausschuss die Erwartung der Firmen, mittelfristig ihre Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit durch die vorwettbewerbliche Forschung, die Rahmen des Projektes durchgeführt wurde, zu verbessern.

6 Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Über die üblichen Wege der Verbreitung von Forschungsergebnissen hinaus in Veröffentlichungen und Berichten der Forschungseinrichtung, ist durch die, sehr enge Zusammenarbeit mit den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen, ein schneller Transfer der Ergebnisse in die industrielle Praxis sichergestellt. Dafür wurden die Ergebnisse allen Interessenten auf Anfrage in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt.

In den regelmäßigen Treffen des projektbegleitenden Ausschusses wurde der Projektfortschritt dokumentiert, die geplante Weiterarbeit diskutiert und korrigiert, sowie die Erfahrung der Beteiligten mit den verschiedenen Aspekten der Zielsetzung kommuniziert.

Daten für Schürdaten unterschiedlicher Rostsysteme in Abhängigkeit von Rostgeometrie und Betriebseigenschaften werden interessierten Firmen bereitgestellt, die als konkrete Auslegungshilfen für Rostsysteme dienen können.

Durch entsprechende Übernahme und Darstellung der Ergebnisse in der akademischen Lehre wird eine weitere Verbreitung der Informationen gewährleistet und über den Personaltransfer in die Industrie getragen.

7 Durchführende Forschungsstelle

Anschrift: Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik
Universitätsstr. 150
44780 Bochum

7.1 Leiter der Forschungsstelle

Prof. Dr.-Ing. V. Scherer
Email: scherer@leat.ruhr-uni-bochum.de

7.2 Projektleiter

Dr.-Ing. S. Wirtz
Email: wirtz@leat.ruhr-uni-bochum.de

7.3 Bearbeiter des Projektes

Dipl.-Ing. B. Brosch
Email: brosch@leat.ruhr-uni-bochum.de

7.4 Unterschrift

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. V. Scherer

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung – Stand: Juni 2005.
- [2] Nitsch et al.: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, BMU, Berlin, 2004.
- [3] Schneider, J.: Schwebestaub in Österreich, Bericht BE-277 für das Umweltbundesamt, Wien, 2006.
- [4] Finzenhagen, F.; Hemmerich, H. D.; Kremer, H.; Wirtz, S.: Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation einer freien Dralldiffusionsflamme, 19. Deutscher Flammentag, Dresden, 1999.
- [5] Krüll, F.; Kremer, H.; Möllenhoff, H.; Wirtz, S.: Numerische Strömungsberechnungen zur Optimierung der Müllrostfeuerung bei unterschiedlichen Kessellasten, VDI-Tagung: Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen, Braunschweig, 2000.
- [6] Krüll, F.: Verfahren zur numerischen Simulation von Müllrostfeuerungen, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2002.
- [7] Kurtoglu, S.; Wirtz, S.; Hannes, K.; Neumann, F.; Scherer, V.: Feuerungssimulation zur Verbesserung der Einbauposition von Staubbremsen im Rippenvorwärmer eines Kraftwerkskessels, 20. Deutscher Flammentag, Essen, 2001.
- [8] Wirtz, S.; Narin, O.; Lebl, A.; Scherer, V.: Numerische Simulation der Regenerierung von HCL- Beizsäure und der Bildung von Fe₂O₃ Partikeln in einem Sprühröstreaktor, Dechema/GVC- Jahrestagung, Mannheim, 2003.
- [9] Boemer, A.: Euler/Euler-Simulation der Fluidodynamik blasenbildender Wirbelschichten, Dissertation, Aachen, 1996.
- [10] Hillers, M., Görner, K.; Severin, T.; Scherer, V.: Prozessoptimierung einer Vorcalcinieranlage der Zementindustrie, 22. Deutscher Flammentag, Braunschweig, 21.-22. September 2005.
- [11] Peters, B.: Thermal Conversion of Solid Fuels, WIT Press, 2003.

- [12] Beckmann, M.; Scholz, R.: Residence Time Behaviour of Solid Material at Grate Systems, 5th Int. Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, 11-14. April, 2000.
- [13] Scholz, R.; Beckmann, M.; F. Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren, Teubner-Reihe Umwelt, ISBN 3-519-00402-X, 2001.
- [14] Wolf, C.: Erstellung eines Modells der Verbrennung von Abfall auf Rostsystemen unter besonderer Berücksichtigung der Vermischung –ein Beitrag zur Simulation von Abfallverbrennungsanlagen–, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [15] Luding, S.: Molecular Dynamics Simulation of Granular Material. In: The Physics of Granular Media, Hinrichsen, H., Wolf, D., eds., Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [16] BayLfU Fachtagung: Anforderungen an Holz-Kleinfeuerungsanlagen bei der Novellierung der 1. BImSchV, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2003.
- [17] www.erneuerbare-energien.de/inhalt/4759/, 19.4.2006.
- [18] www.bioenergie.de/pm/pm_BBE_maerz06.html, 19.4.2006.
- [19] www.maanen.de/downloads/basisdatenbioenergie.pdf, 19.4.2006
- [20] Merten, D.; Falkenberg, D.; Nill, M.; Kaltschmitt, M.: Wärmegewinnung aus Biomasse, Anlagenband zum Abschlussbericht „Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ für das BMWA, Leipzig, 2004.
- [21] I.D.E.E.eV: <http://www.idee-nrw.de/pdfs/herstpellet.pdf>, 19.4.2006
- [22] Klasen, T.; Görner, K.: Numerical Calculation and Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator Plant, 2nd International Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, 1999.
- [23] Fan L. T.; Too J. R.; Rubison R. M.; Lai F. S.: Studies on Multicomponent Solids Mixing and Mixtures Part III. Mixing Indices, Powder Technology 24, Issue 1, 73-89, 1979
- [24] Kruggel-Emden H.; Simsek E.; Wirtz S.; Scherer V.: A Comparative Numerical Study of Particle Mixing on Different Grate Designs through the Discrete Element Method, Journal of Pressure Vessel Technology 129, Issue 4, 593-600, 2007
- [25] VIGRA Computer Vision Library Version 1.6.0: <http://hci.iwr.uni-heidelberg.de/vigra/>, 12.10.2009

-
- [26] Canny J.: A Computational Approach to Edge-Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 8, Issue 6, 679-698, 1986
- [27] Hough P. V. C.: Method and means for recognizing complex patterns, US Patent 3069654, 1962
- [28] Kruggel-Emden H.; Simsek E.; Rickelt S.; Wirtz S.; Scherer V.: Review and extension of normal force models for the discrete element method, Powder Technology 171, Issue 3, 157-173, 2007
- [29] Kruggel-Emden H.; Simsek E.; Wirtz S.; Scherer V.: A Comparison and Validation of Tangential Force Models for the Use within Discrete Element Simulations, DEM07 Conference, 27.-29. August 2007, Brisbane, 2007
- [30] Zwischenbericht AiF-Vorhaben 15061 / N: Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen, Zeitraum 01.01.07 bis 31.12.08
- [31] Luding, S., Matesberger, K. Müllers, J.: A discrete Model for long time sintering, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Volume 53, Issue 2, February 2005, Pages 455-491