

# BESTIMMUNG DES MISCHGÜTEVERLAUFES MIT HILFE DER BILDAUSWERTUNG BEIM DISKONTINUIERLICHEN FESTSTOFFMISCHEN

Björn Daumann<sup>1</sup>, Hermann Nirschl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH), Straße am Forum 8, 76128 Karlsruhe, email: [bjoern.daumann@mvm.uka.de](mailto:bjoern.daumann@mvm.uka.de)

## Kurzfassung

In den hier vorliegenden Abschnitten wird über die verfahrenstechnische Grundoperation des Feststoffmischens berichtet. Die Feststoffe befinden sich hierzu in einem diskontinuierlichen Chargenmischer. Über den so genannten Mischgüteverlauf, der die Verteilung der einzelnen Feststoffe über der Mischzeit angibt, kann die Mischzeit bestimmt werden. Die Bestimmung des Mischgüteverlaufes geschieht mit Hilfe der Bildauswertung, indem der zu interessierende Feststoff durch eine Tracerkomponente ersetzt wird. Aus der Verteilung der Feststoffe ist es möglich, den Dispersionskoeffizienten bzw. die Mischzeit zu ermitteln. In den nachfolgenden Ausführungen wird über die Methodik des Messverfahrens und die Abhängigkeit des Dispersionskoeffizienten von den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen berichtet.

## 1 Einleitung

Das Mischen von dispersen Feststoffen ist in zahlreichen verfahrenstechnischen Prozessen der Baustoff-, Lebensmittel- und Pharmaindustrie sowie anderen Branchen zu finden. Das Ziel des Anwenders beim Einsatz eines Chargenmischers ist es, eine definierte Homogenität der zu mischenden Feststoffe in einer möglichst kurzen Mischzeit zu erreichen. Die Veränderung der Mischgüte über der Mischzeit wird durch den Mischgüteverlauf beschrieben. Die Bestimmung des Mischgüteverlaufes erfolgt klassisch nach den Regeln der Statistik, indem repräsentative Feststoffproben aus dem Mischraum entnommen und außerhalb auf ihre Zusammensetzung hin analysiert werden. Jeder einzelne Messpunkt im Mischgüteverlauf repräsentiert das Ergebnis mehrerer Probenahmen, deren Anzahl der Anwender festlegt. Diese müssen dann außerhalb des Mischers mit relativ hohem Aufwand analysiert werden. Je mehr Proben aus dem Mischraum entnommen werden, desto mehr nähert sich das Ergebnis der Konzentrationsmessungen dem Erwartungswert an. Durch das Entnehmen der Probe entsteht aber an der Entnahmestelle immer

ein irreversibler Eingriff, der die umgebende Mischung maßgeblich beeinflusst. Die systematische Probenentnahme an fest definierten Stellen ist notwendig, um sinnvolle Vergleiche von Mischgüteverläufen bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen anstellen zu können. Die beschriebene Vorgehensweise ist bereits ausführlich in der verfügbaren Literatur dargestellt und diskutiert worden [1, 2] und untersucht worden. Wird die Probenahme nach dem Stand des Wissens ausgeführt, so muss der Mischraum nach [3] systematisch in einzelne Segmente aufgeteilt werden. Durch einen geeigneten Probennehmer und die Unterstützung durch einen Zufallsgenerator werden die zu analysierenden Einzelproben aus den verschiedenen Segmenten ausgewählt und entnommen. Die Analyse der Proben findet dann außerhalb des Mischraumes statt. Beibehalten die zu analysierenden Proben Komponenten, welche aushärten können, so sind außerhalb des Mischraumes angewendete Messverfahren eher ungeeignet. Eine Lösung des Problems können optische oder auch radiometrische Messverfahren sein, welche die Analyse direkt im Mischraum selbst ermöglichen.

Der in dieser Arbeit dargelegte Fortschritt für die Mischungsanalyse liegt in der Entwicklung einer Bildauswertungsmethode ohne Probennahme zur direkten Ermittlung von Konzentrationsverlauf und Mischgüteverteilung während des Mischvorganges im Mischapparat. Eine CCD-Videokamera registriert den Mischprozess während der gesamten Mischzeit, so dass jederzeit auf bestimmte Sequenzen zurückgegriffen werden kann und beliebig viele Messpunkte für den Mischgüteverlauf generierbar sind. Ein Vorteil dieser Messmethode ist, dass die Kamera bei Änderung der Baugröße des Mixers oder des Probenvolumens flexibel angepasst werden kann. Außerdem besteht jederzeit Zugriff auf die Rohdaten, um gegebenenfalls die Auswertungsmethode variieren zu können. Schließlich können bewegte Bilder über die Zeit des gesamten Mischprozess den Vorgang im Mischer anschaulich verdeutlichen.

## **2 Materialien, Apparaturen und Messmethode**

### **2.1 Bestandteil der Modellmischung**

Bei den Untersuchungen wurden drei Fraktionen (Modellmischung) ausgewählt, die sich durch die Partikelgröße unterscheiden, nicht jedoch durch Feststoffdichte  $\rho_S$ , Schüttdichte  $\rho_{Schütt.}$  und nur in relativ geringem Maße durch den Formfaktor  $\Psi$ . In der Tabelle 1 sind die gemessenen Größen angegeben. Die Partikelgrößenverteilung  $Q_3$  (Abb. 2) der einzelnen Fraktionen wurde möglichst eng gewählt. Die massenbezogene Feuchte  $x_W$  ist zu vernachlässigen.

Tabelle 1: Materialparameter der Modellmischung

Materialdaten	Grobgut	Mittelgut	Feingut
Feststoffdichte $\rho_s$	2700kg/m <sup>3</sup>	2700kg/m <sup>3</sup>	2740kg/m <sup>3</sup>
Schüttdichte $\rho_{\text{Schütt.}}$	1400kg/m <sup>3</sup>	1400kg/m <sup>3</sup>	1430kg/m <sup>3</sup>
Feuchte $x_w$	<0,1%	<0,1%	<0,1%
Sphärizität $\Psi$	0,76	0,67	0,74

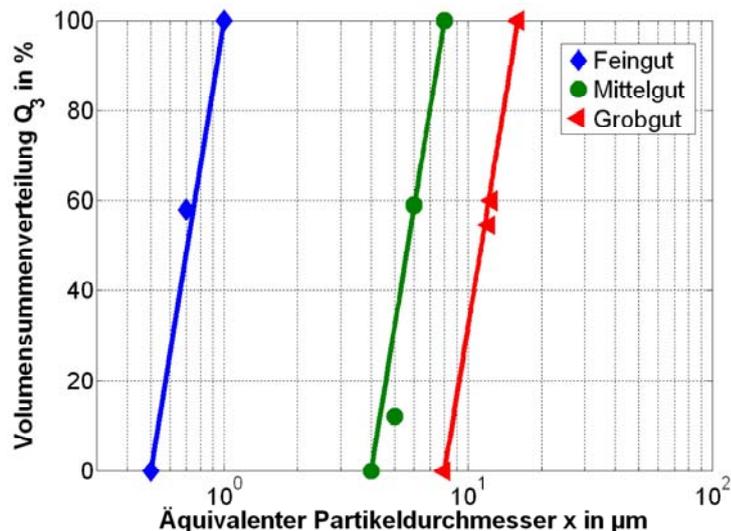


Abb. 1: Partikelgrößenverteilung der Modellmischung

## 2.2 Produktcharakteristik des Tracers

Für die Mischversuche wurden spezielle farbige Partikel (Tracerpartikel) verwendet, welche im Mischraum durch einen deutlichen Kontrast zur Umgebung hinreichend gut zu identifizieren waren. Pigmente unterschiedlicher Eigenschaften wurden bereits in anderen Arbeiten erfolgreich eingesetzt [4, 5]. Um die Produkteigenschaften des Mischgutes (Festigkeiten, Fließigenschaften etc.) durch die Einfärbung mit dem Pigment nicht unzulässig zu beeinflussen, wurde entsprechend einer Herstellerempfehlung ein Konzentrationsbereich von  $\overline{c_{P,E}} = 0,5\% - 1\%$  (auf die Gesamtmenge bezogen) eingesetzt.

Mit dem hier verwendeten Tracer sollte nicht eine bestimmte Partikelfraktion eingefärbt oder markiert werden, sondern dieser Tracer sollte als Ersatzstoff bzw. Füllstoff für die zu interessierende Komponente (hier Zement) dienen. Der Zement wurde also durch den Tracer ersetzt, um sein Mischverhalten mit den übrigen Komponenten der Modellmischung visualisieren zu können. Die untersuchte Mischung bestand aus dem Tracer und weiteren drei unterschiedlichen Par-

tikelfractionen im Bereich von 0,5mm-16mm. Weitere Informationen zu den Eigenschaften der Modellmischung können der Literatur entnommen werden [6].

Das hier gewählte Pigment war Ultramarinblau, da sich dessen Partikel in Bezug auf Dichte, Größe, Fließverhalten, Sphärizität und Verdichtungsverhalten gegenüber Zement sehr ähnlich verhalten. In Voruntersuchungen konnte belegt werden, dass das ausgewählte Material eine Identifizierung im Bildauswerteprogramm zulässt und sein Farbspektrum nahezu beibehält. Die Farbintensität darf bei Zugabe von Flüssigkeit und anderen Komponenten keine Farbveränderungen aufweisen, wenn sich der Tracer mit fortschreitender Mischzeit immer gleichmäßiger im gesamten Mischraum verteilt.

Die Feststoffdichte  $\rho_s$  ist bei beiden Produkten in etwa gleich. Die Partikelgrößenverteilungen von Zement und Ultramarinblau wurden mit Hilfe der Laserbeugung gemessen. Aus den Volumensummenverteilungen  $Q_3(x)$  ergaben sich nach Tabelle 2 die jeweiligen Partikelgrößen  $x_{10}$ ,  $x_{50}$  und  $x_{90}$ . Das Farbpigment wies eine engere Partikelgrößenverteilung auf als der Zement. Breitere Partikelgrößenverteilungen des Pigmentes konnten nicht kommerziell erworben werden. Die erhältlichen Größenklassen hatten mittlere Partikelgrößen von  $x_{50} \approx 1 \mu\text{m}$ ,  $x_{50} \approx 5 \mu\text{m}$ ,  $x_{50} \approx 15 \mu\text{m}$ . Da Zement ungefähr eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50} \approx 13 \mu\text{m}$  besitzt, wurde die Größenklasse von  $x_{50} \approx 15 \mu\text{m}$  ausgewählt. Über die Bestimmung der Schüttdichte und der Stampfdichte sind die dimensionslosen Kennzahlen Hausnerratio  $H$  und Carr-Index  $C$  bestimmbar [7, 8]. Diese Kennzahlen beschreiben das Verdichtungsverhalten von feinen Pulvern. Da der Hausnerratio  $H \geq 1,15$  und der Carr-Index  $C \geq 25\%$  betragen, sind dies nach Definition beider Autoren Schüttgüter mit eingeschränktem Fließverhalten.

Tabelle 2: Materialparameter des Tracers

	<b>Ultramarinblau</b>	<b>Zement</b>
<b>Farbe</b>	Blau	Grau
<b>Feststoffdichte <math>\rho_s</math></b>	2400kg/m <sup>3</sup>	2900kg/m <sup>3</sup>
<b>Partikeldurchmesser <math>x_{10}</math></b>	10,5 $\mu\text{m}$	2,4 $\mu\text{m}$
<b>Partikeldurchmesser <math>x_{50}</math></b>	16,2 $\mu\text{m}$	13,51 $\mu\text{m}$
<b>Partikeldurchmesser <math>x_{90}</math></b>	20,5 $\mu\text{m}$	82 $\mu\text{m}$
<b>Hausnerratio <math>H</math></b>	1,41	1,45
<b>Carr-Index <math>C</math> (%)</b>	29,3	31,4

Die Bestimmung der Fließeigenschaften von trockenen und feuchten Feststoffen wurde nach der Auswertemethode von [9] in einer Jenike-Scherzelle durchgeführt. Die zugehörigen Messergeb-

nisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Fließort, der die Scherspannung  $\tau_N$  über der Normalspannung  $\sigma_N$  darstellt, zeigt für das Pigment Ultramarinblau und den Zement vergleichbare Ergebnisse. Die Menge von Zement bzw. Pigment blieb konstant, während der Wasseranteil variiert wurde. Je höher der Wasserzementwert  $W/C$  wurde, desto stabiler war die Schüttung gegen Scherung infolge der von zunehmenden kapillaren Haftkräften verursachten inneren Reibung. Erst bei Wasserzementwerten von  $W/C \geq 25\%$  sank die Scherspannung wieder ab, was auf ein sich wieder verbesserndes Fließverhalten signalisiert. Der Zement erreicht seine vollständige Haufwerkssättigung bei  $W/C \geq 25\%$ , und das nun frei bewegliche Wasser erhöht die Fließfähigkeit der Masse. Messungen mit der Scherzelle sind in diesem Fall dann nicht mehr möglich.

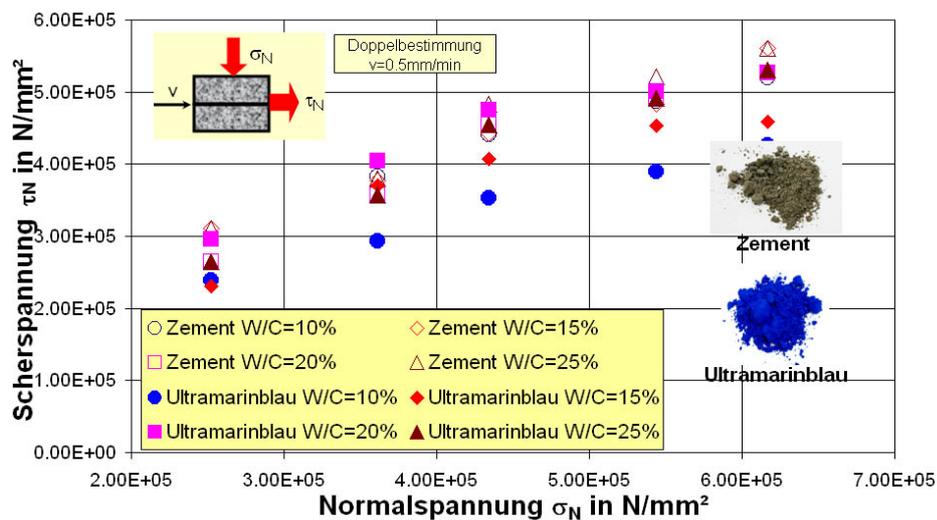


Abb. 2: Fließortbestimmung nach Jenike

### 2.3 Versuchsapparate und -aufbau

Die Versuche wurden an einem horizontalen Zweiwellen-Chargenmischer der Firma ELBA-Werk Maschinen GmbH durchgeführt. Das Volumen des Zweiwellenmischers beträgt nach Abbildung 3,  $V=120\text{L}$ . Der Mischer besitzt ein wendelförmiges Mischwerkzeug. Charakteristisch für den Zweiwellenmischer ist, dass sich die zwei Mischwerkzeuge im Mittelteil des Mischraumes überschneiden. Diese bewegen sich gegenläufig zueinander und fördern das Produkt vom äußeren Rand des Troges nach Innen. Das Mischwerkzeug des Zweiwellenmischers ist wandgängig. Das Verhältnis Trommeldurchmesser zu Länge beträgt  $D_T/L \approx 2$ . Der Füllgrad  $\varphi$  entspricht etwa  $\varphi \approx 50\%$ . Die Drehzahl  $n$  kann stufenlos bis  $49\text{U}/\text{min}$  eingestellt werden.

Das Auswerten von Bildern an der Oberfläche eines Mischers ist nur möglich, wenn eine ausreichende Zugänglichkeit für die Digitalkamera und die Lichtquellen zur Verfügung stehen. Die Schattenbildung durch das Mischwerkzeug und den Trogrand ist durch die Beleuchtung und

eine optimale Positionierung der Kamera nach Abbildung 4 zu verhindern. Für diese Untersuchungen wurden spezielle farbige Partikel verwendet, die sich im Mischraum deutlich voneinander unterscheiden. In Voruntersuchungen wurde gezeigt, dass das Material eine Unterscheidung im Bildauswerteprogramm zulässt.

Jedes einzelne Digitalbild ist ein zeitliches Abbild eines bestimmten Mischzustandes im Mischraum. Eine ausreichend große Partikelgröße, im Bereich von einigen Millimetern, ist bei dieser Art der Bildauswertung von Vorteil, da die Größenunterschiede/Farbunterschiede wiedergegeben werden können.

Die hier eingesetzte Videokamera Sony VX2100E hat eine Auflösung von 720Pixel×576Pixel mit einer Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde. Durch die senkrechte Positionierung der Videokamera über dem Mischraum kann der Mischvorgang kontinuierlich beobachtet bzw. aufgezeichnet werden. Eine 1000W Halogenlampe leuchtet den Mischraum so aus, dass die Schattenbildung durch das Mischwerkzeug und den Trogrand nach Abbildung 3 stark reduziert wird und die Fremdlichteinflüsse gering gehalten werden, so dass diese potenziellen Fehlerquellen bei der Auswertung außer Acht gelassen werden können.



Abb. 3: Sicht auf den Mischraum des Laborzweiwellenmischer mit wendelförmigem Mischwerkzeug



Abb. 4: Seitenansicht der senkrecht positionierten Videokamera

## 2.4 Auswertemethode für die Bildanalyse

Die aufgenommenen Digitalbilder haben eine Auflösung von 720Pixel×576Pixel. Die blaue Komponente kann daher nicht bis zur Primärpartikelgröße aufgelöst werden. Es ist möglich, mit einer Auflösung von 366,8 mm<sup>2</sup> je Probe einen Eindruck über die Mischgüte zu erhalten. Mit zunehmender Auflösung wären Details zwar besser zu erkennen, allerdings können dann störende Inhomogenitäten wie Reflexionen von Partikeln oder Schattenbildung von Mischwerkzeugen und dem Trogrand den Mischgüteverlauf dominieren. In den Auswertungen zeigte sich jedoch, dass eine Auflösung von 366,8 mm<sup>2</sup> völlig ausreicht, um den Mischgüteverlauf zur Cha-

rakterisierung der Homogenität zu beschreiben. Die einzelnen Digitalbilder ergeben sich aus einer Bildrate von einer Aufnahme pro Sekunde.

Die Einzelbilder werden im Adobe Photoshop® CS2 so nachbearbeitet, dass nach Einstellung eines Schwellwertes nur die blaue Komponente erhalten bleibt. Der Schwellwert definiert in der Bildanalyse die Unterscheidbarkeit zwischen dem Tracer und der Modellmischung. In Vorversuchen wird der Schwellwert von einzelnen Befehlsfolgen definiert, welche während der eigentlichen Versuche nicht mehr verändert werden dürfen. In Abbildung 5a und b ist das Separationsverfahren der blauen Komponente dargestellt. Durch eine bildanalytische Verstärkung der Tracerfarbe nach Abbildung 5b kann die Tracerkomponente separiert werden.

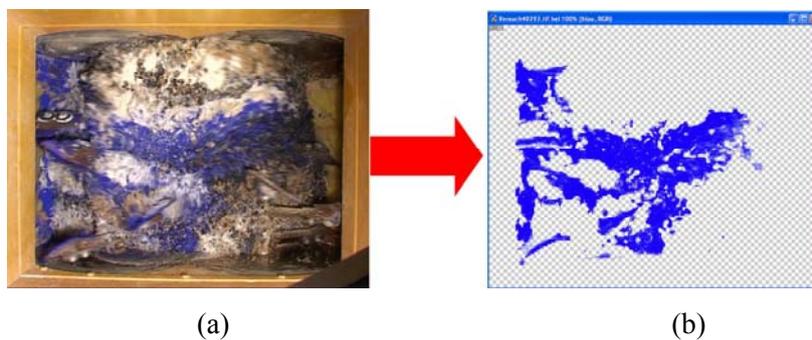


Abb. 5: Festlegung des Schwellwertes im Adobe Photoshop® CS2 (a) Originalbild, (b) separierte Fraktion

Die Bestimmung der Probenkonzentration  $c_{P,i}$  und daraus, bei bekanntem Sollwert  $\overline{c_{P,E}}$ , die Errechnung der empirischen Varianz  $s^2$  nach Gleichung 1 erfolgt durch eine Aufteilung der Digitalbilder in einzelne Segmente (Abb. 6) mit Hilfe eines in [10] beschriebenen Auswertalgorithmus. Die Segmente stellen eine Probenfläche  $A_P$  dar, die beim Zweiwellenmischer  $A_P=15\text{Pixel} \times 12\text{Pixel}$  entsprechen. Daraus errechnet sich eine Gesamtprobenmenge von  $m_P \approx 2,8$  g, was z.B. einer Tracerpartikelzahl von  $2,3 \cdot 10^9$  entspricht. Für ein  $720\text{Pixel} \times 576\text{Pixel}$  Digitalbild des gesamten Mischers ergibt sich damit eine Probenanzahl von  $N_P=576$ . Eine geringere Probenanzahl hilft die notwendige Rechnerleistung zu reduzieren. Die mögliche Reduktion der Gesamtprobenanzahl  $N_P=576$  geschieht mit Hilfe eines Zufallsgenerators, der statistisch eine Probenanzahl für die Auswertung von  $N_P=120$  auswählt. Die Schattenbildung am Trogrand und im Bereich der Mischerwelle ist in die Berechnungen nicht einbezogen.

$$s^2 = \frac{1}{120} \cdot \sum_{i=1}^{120} \left( c_{P,i} - \overline{c_{P,E}} \right)^2 \quad (1)$$

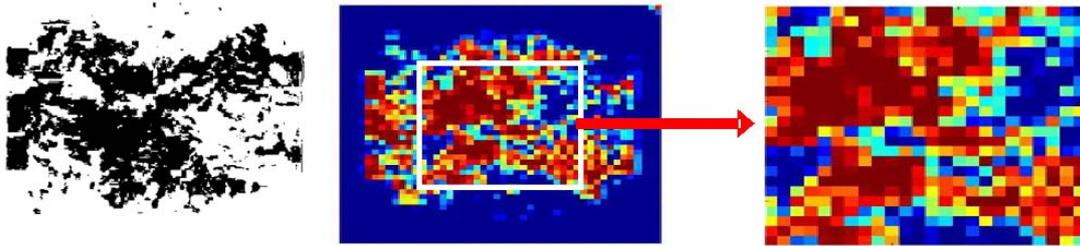


Abb. 6: Prinzipabbildung bei der Segmentierung der Digitalbilder und Reduktion des Bildausschnitts

Wird die empirische Varianz  $s^2$  über der Mischzeit  $t_M$  aufgetragen, so ergibt sich der Mischgüteverlauf. Durch die FOKKER-PLANCK-Gleichung kann bei Annahme eines stochastischen Mischprozesses eine eindimensionale Lösung angegeben werden, um den Mischgüteverlauf zu beschreiben. Die Gleichung 2 enthält neben der Varianz des Messfehler  $\sigma^2_M$ , der Zufalls Mischung  $\sigma^2_Z$ , die Konzentrationsausgleichslänge  $L$  des Mischers, die Mischzeit  $t_M$ , die Masse des Einzelpartikels  $m_E$ , die Probenmenge  $m_P$  und die Varianz der Nullmischung  $\sigma^2_0$ . Die Bestimmung des Dispersionskoeffizienten  $D$  erfolgt aus der Steigung durch lineare Regression, wenn alle anderen Größen wie Mischzeit  $t_M$ , empirische Varianz  $s^2$  etc. bekannt sind. Er eignet sich als Vergleichsgröße für unterschiedliche Ausgangswerte, Produkte und Versuchsbedingungen.

$$s^2 = \sigma^2_z + \sigma^2_m + \left(1 - \frac{m_E}{m_P}\right) \cdot \sigma^2_0 \cdot \exp\left(-\left(2 \cdot \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \cdot D \cdot t_M\right)\right) \quad (2)$$

### 3 Versuchergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Versuchsdurchführung

Die Mischzeit hat einen Einfluss nach [11] auf die Drehzahl  $n$ , den Füllgrad  $\varphi$ , die Pigmentkonzentration  $c_P$ , und die massenbezogene Feuchte  $x_W$ . Da nach [12] ein Einfluss von der Anordnung der Komponenten in der Ausgangsmischung (Modellmischung) beobachtet wurde, erfolgte die Anordnung der Komponenten der Modellmischung aus den drei Partikelfraktionen immer in gleicher Reihenfolge. Die drei Fraktionen wurden horizontal im Mischer positioniert, wobei zunächst die feinste Partikelfraktion mit der mittleren Fraktion überschichtet und diese schließlich von der größten Partikelfraktion bedeckt wurde. Die Modellkomponenten wurden vor der Einlagerung in den Mischer einzeln während einer Mischzeit  $t_M$  von 30-40sec in einem separaten Mischer befeuchtet und die gewünschte Feuchte bei allen drei Fraktionen der Modellmischung eingestellt. Die Einflussgrößen die variiert wurden, ist der Aufgabepunkt der Tracer-

komponente, die Drehzahl  $n=15\text{U/min}-35\text{U/min}$ , die massenbezogene Feuchte von  $x_w=2,5-10\%$  und der Feingutanteil in der Mischung.

### 3.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

Die Aufgabeveränderungen der Nullmischung mit Tracer sind in Abbildung 7 erkennbar. Abbildung 7a stellt einen horizontalen Schnitt durch den Mischer dar. Abbildung 7b und c gibt einen Blick auf die Oberfläche des Mixers wieder. Nach Abbildung 7b befindet sich der Tracer vertikal im Mischraum, jedoch ist die Aufgabe des Tracers senkrecht zur Mischerachse. Die Tracerkomponente nach Abbildung 7c wurde parallel zur Mischerachse aufgegeben mit vertikaler Markierung zur Feststoffschüttung.

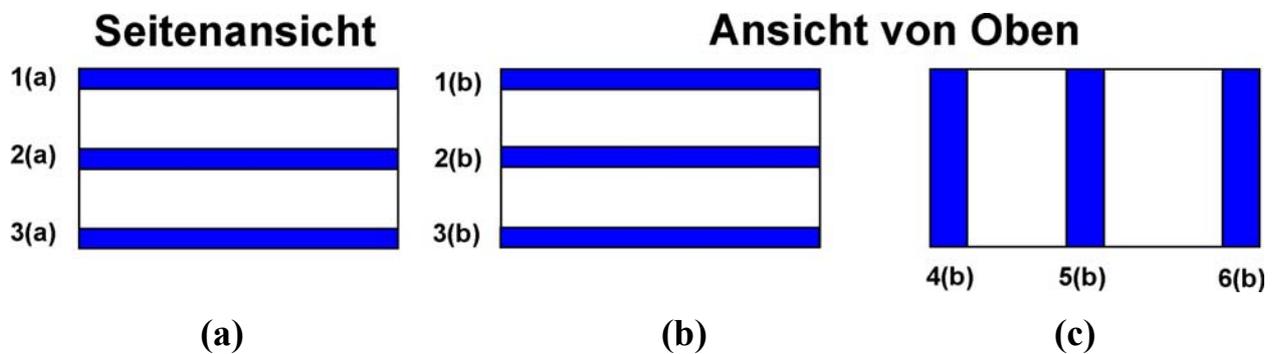


Abb. 7: mögliche Nullmischungen mit Tracermarkierung, (a) horizontale Positionierung des Tracers, (b) vertikale Positionierung des Tracers senkrecht zur Mischerachse, (c) vertikale Positionierung des Tracers parallel zur Mischerachse, alle Versuche wurden bei massenbezogener Feuchte  $x_w=5\%$  durchgeführt.

Tabelle 3: Dispersionskoeffizienten bei Variation des Aufgabcortes

Horizontaler Aufgabcort		Vertikaler Aufgabcort	
1(a) $49,1\text{cm}^2/\text{s} \pm 4\text{cm}^2/\text{s}$	1(b) $41,9\text{cm}^2/\text{s} \pm 7\text{cm}^2/\text{s}$	4(b) $51,2\text{cm}^2/\text{s} \pm 5\text{cm}^2/\text{s}$	
2(a) $47,3\text{cm}^2/\text{s} \pm 5\text{cm}^2/\text{s}$	2(b) $47,4\text{cm}^2/\text{s} \pm 4\text{cm}^2/\text{s}$	5(b) $46,3\text{cm}^2/\text{s} \pm 5\text{cm}^2/\text{s}$	
3(a) $49,0\text{cm}^2/\text{s} \pm 4\text{cm}^2/\text{s}$	3(b) $50,0\text{cm}^2/\text{s} \pm 6\text{cm}^2/\text{s}$	6(b) $51,4\text{cm}^2/\text{s} \pm 5\text{cm}^2/\text{s}$	

Werden die Dispersionskoeffizienten für die einzelnen Nullmischungen verglichen, so stellt sich heraus, dass die Dispersivität, wie aus der Herleitung der FOKKER-PLANCK-Gleichung, bei gleichen Produkten einer konstanten Größe entspricht. Nur die Mischzeiten sind bei den unterschiedlichen Traceraufgaben verschieden, da die Konzentrationsausgleichslänge z.B. bei 2(b) zu Traceraufgabe 1(b) und 3(b) um den Faktor zwei kürzer ist. Dies bedeutet, nach Gleichung 2, eine um den Faktor vier kürzere Mischzeit.

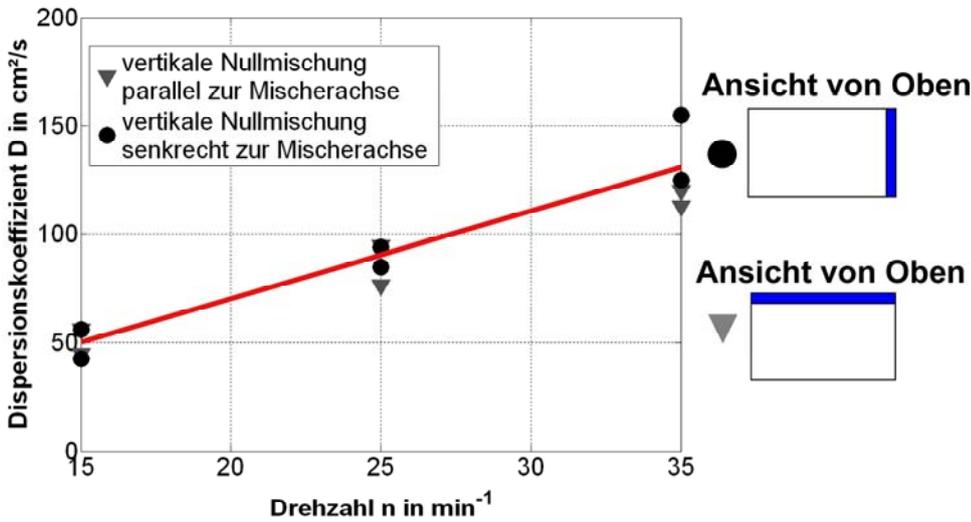


Abb. 8: Variation der Drehzahl bei zwei vertikalen Nullmischungen, massenbezogene Feuchte  $x_w=5\%$

In Abbildung 8 wird die Drehzahl variiert im Bereich von  $n=15\text{U}/\text{min}$  bis  $35\text{U}/\text{min}$ . Die Abbildung zeigt zwei verschiedene Nullmischungen mit vertikaler Traceraufgabe. Die massenbezogene Feuchte des Schüttgutes ist bei den durchgeführten Versuchen  $x_w \approx 5\%$ . Mit steigender Drehzahl steigt der Dispersionskoeffizient proportional an, wie auch in [11] dokumentiert, d.h. die Mischzeit verkürzt sich. Der lineare Zusammenhang zwischen dem Dispersionskoeffizienten und der Drehzahl erklärt sich darin, dass nach Gl.2 die Mischzeit  $t_M$  umgekehrt proportional  $D \sim 1/t_M$  zum Dispersionskoeffizienten ist, bei gleicher Homogenität. Die Mischzeit  $t_M$  verkürzt sich bei den hier durchgeführten Versuchen von  $n=15\text{U}/\text{min}$  auf  $n=35\text{U}/\text{min}$  um den Faktor von etwa 2,6.

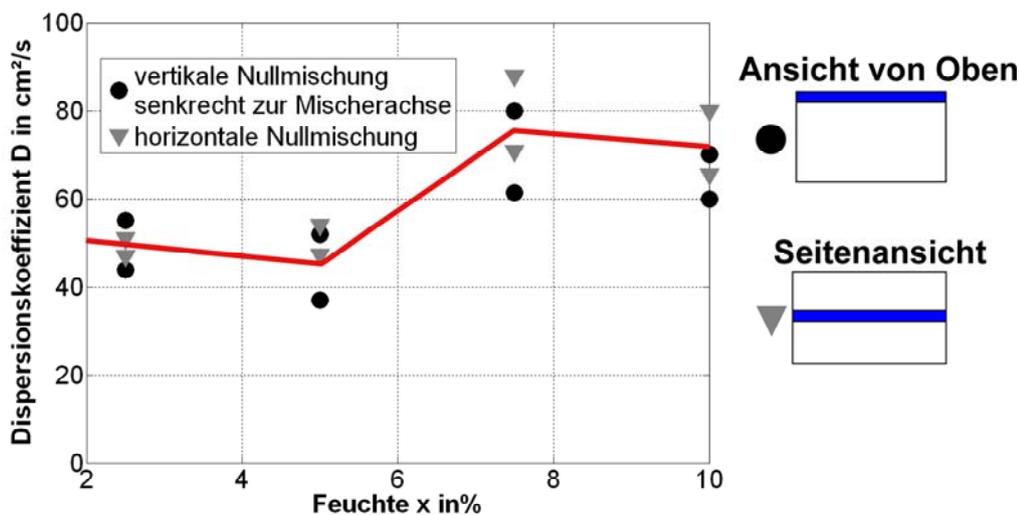


Abb. 9: Variation der massenbezogenen Feuchte bei zwei vertikalen Nullmischungen, Drehzahl  $n=15\text{U}/\text{min}$

Bei der Variation der massenbezogenen Feuchte werden zwei Nullmischungen variiert. Diese sind die vertikale Nullmischung, die senkrecht zur Mischwerkzeugachse positioniert ist, und die horizontale Nullmischung. Die Untersuchungen finden bei massenbezogenen Feuchten von  $x_w=2,5\%$  bis  $x_w=10\%$  statt. Für die vertikale und horizontale Nullmischung ergibt sich, im Bereich  $x_w=2,5\%$  bis  $x_w=5\%$  ein etwa konstanter Dispersionskoeffizient. Erst wenn sich mehr Wasser in der Schüttung befindet, erhöht sich der Dispersionskoeffizient um den Faktor von etwa 1,7. Die Ursache für die konstanten Bereiche bei niedrigen Feuchten ist darin zu begründen, dass durch die sich ausbildenden kapillaren Haftkräfte die Beweglichkeit der Partikel eingeschränkt wird und somit keine Veränderung der Dispersivität eintritt. Erst wenn die Schüttung eine maximale Haufwerkssättigung, hier massenbezogene Feuchte von  $x_w=7,5\%$  erreicht hat, wird die Fließfähigkeit der Partikel verbessert, so dass sich die Beweglichkeit der Partikel erhöht. Wird nun mehr Wasser  $x_w \geq 7,5\%$  zum Haufwerk hinzugegeben, so erniedrigt sich die Beweglichkeit der Tracerpartikel wieder, was sich in einem reduzierten Dispersionskoeffizient widerspiegelt.

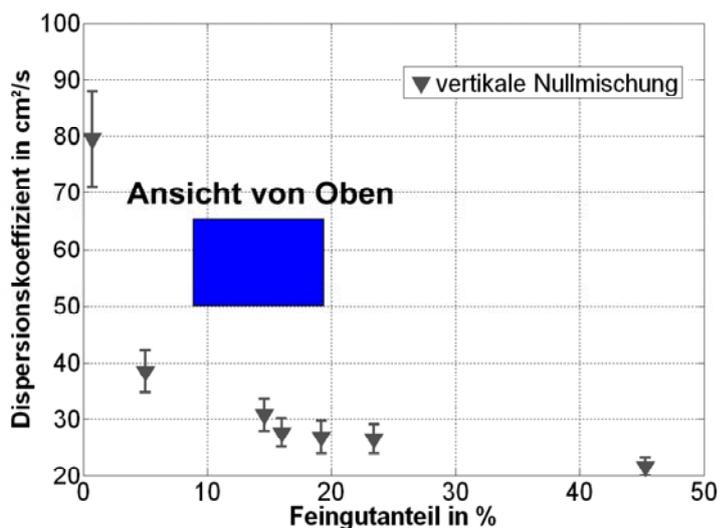


Abb. 10: Variation des Feingutanteils in der Nullmischung, massenbezogene Feuchte  $x_w=6,5$  bis  $7,5\%$ , Drehzahl  $n=15U/min$

Aus den vorliegenden Untersuchungen wird deutlich, dass sich bei massenbezogenen Feuchten von  $x_w \geq 7,5\%$  ein höherer Dispersionskoeffizient einstellt. Wird der Tracer horizontal zur Mischerachse als Nullmischung aufgegeben, so ist die Mischzeit durch den radialen Mischtransport am geringsten. In einem weiteren Untersuchungsschritt wird daher der Feingutanteil im Haufwerk erhöht, so dass der Einfluss der Mischzeit auf den Feingutanteil untersucht werden kann. Da bei hohen Flüssigkeitsgraden die Mischungen fließfähig sind, ist eine vertikale Nullmischung nicht möglich. Es kann nur die horizontale Nullmischung 1(b) nach Abbildung 7a für die Untersuchungen herangezogen werden.

Der Feingutanteil in der Mischung definiert die Masse aller Partikel kleiner als 250  $\mu\text{m}$  dividiert durch die Gesamtmasse der Mischung. Durch den steigenden Feingutanteil in der Mischung muss die massenbezogene Feuchte im Bereich von  $x_w=6,5\%$  bis  $x_w=7,5\%$  variiert werden. Dies liegt an der Tatsache, dass durch den steigenden Feingutanteil mehr freie Oberfläche zur Verfügung steht, die mit Wasser benetzt werden muss, bis die Mischung fließfähig wird.

Die Abbildung 10 zeigt die Dispersionskoeffizienten in Abhängigkeit der Feingutanteile von 0,71% bis 45%. Ein höherer Anteil an Feingut erschwert die Mischaufgabe und verlängert die Mischzeit. Bei Feingutanteilen von 0,71% auf circa 45% nimmt die Mischzeit um den Faktor von etwa vier. zu.

## 4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde über das Feststoffmischen in einem Zweiwellenchargenmischer berichtet. In diesem Chargenmischer erfolgte die Bestimmung der Mischzeit mit Hilfe eines bildgebenden Messverfahrens. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte auf der Basis bekannter statistischer Zusammenhänge für das Feststoffmischen. Mittels der FOKKER-PLANCK-Gleichung ist der Mischgüteverlauf bei bekanntem Dispersionskoeffizient berechenbar. Dieser Koeffizient wird aus den Versuchsergebnissen bestimmt. Er ist für den jeweils eingesetzten Mischer und das verwendete Produkt eine charakteristische Vergleichsgröße. Variiert wird die massenbezogene Feuchte, der Aufgäbeort der Nullmischung, Feingutanteil in der Mischung und die Drehzahl der Mischwerkzeuge. Es zeigt sich, dass dieses Messverfahren für den hier beschriebenen Anwendungsfall zuverlässige Dispersionskoeffizienten liefern kann.

## 5 Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die finanzielle Unterstützung. Des Weiteren danken die Autoren der Firma ELBA-Werk Maschinen GmbH für das Bereitstellen des Zweiwellenlabormischer und der Versuchsprodukte. Für die umfangreichen Versuche mit dem Zweiwellenlabormischer möchten die Autoren Hr. Dipl.-Ing. A. Fath danken, der während seiner Diplomarbeit die Versuche durchführte.

## 6 Symbole

C	Carr-Index [%]
$\overline{c_{P,E}}$	Sollwert Pigmentkonzentration [-]
$c_{P,i}$	Pigmentkonzentration einer Probe i [-]

D	Dispersionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$D_T$	Trommeldurchmesser [m]
$D_W$	Werkzeugdurchmesser [m]
H	Hausner-ratio [-]
j	Probe der Bildoberfläche [-]
L	Länge des Mixers [m]
$m_P$	Probenmenge [kg]
$m_E$	Masse des Einzelkornes vom Tracer [kg]
n	Drehzahl [ $\text{s}^{-1}$ ]
$N_P$	Anzahl der Proben [-]
$Q_3$	Volumenverteilung [%]
V	Volumen des Mixers [ $\text{m}^3$ ]
$s^2$	empirische Varianz [-]
$t_M$	Mischzeit [s]
W/C	Wasser-Zement-Wert [-]
x	Weg [m]
$x_{10}$	mittlerer Partikeldurchmesser bei $Q_3=10\%$ -Wert [m]
$x_{50}$	mittlerer Partikeldurchmesser bei $Q_3=50\%$ -Wert [m]
$x_{90}$	mittlerer Partikeldurchmesser bei $Q_3=90\%$ -Wert [m]

### Griechische Symbole

$\varphi$	Füllgrad [-]
$\rho_s$	Feststoffdichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\sigma_N$	Normalspannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$\sigma^2$	Varianz [-]
$\sigma^2_0$	Varianz der Nullmischung [-]
$\sigma^2_{\text{Syst.}}$	Systematische Varianz [-]
$\sigma^2_M$	Varianz des Messwertes [-]
$\sigma^2_Z$	Varianz der gleichmäßigen Zufallsmischung [-]
$\tau$	Scherspannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]
$\Psi$	Sphärizität [-]

## 7 Literatur

- [1] Raasch J., Elsässer B. (1995). Vergleich der Mischgüte eines Durchlaufmischers mit der eines Chargenmischers. Schüttgut 1, 497-503.
- [2] Hauser G., K. T., Sommer K. (1989). Bestimmung der Mischzeit eines Schaufelmischers mit Schnellentleerung für die Herstellung von Trockenmörtel und Putz, Determination of mixing times of paddle mixer with rapid discharge for production of dry mortar and plaster. AT Aufbereitungstechnik/Mineral Processing 30, 367-374.
- [3] Koch T., H. G., Zettl T. und Sommer K. (1996). Mischzeitbestimmung an einem horizontalen Einwellenmischer. Schüttgut 2, 67-72.
- [4] Collin, P. H. Je'ze'quel (2007). Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects. Cement and Concrete Research 7, 1321-1333.
- [5] Lee H.-S., J.-Y.L. and Yu M.-Y. (2005). Influence of inorganic pigments on the fluidity of cement mortars, Cement and Concrete Research 35, 703-710.
- [6] Daumann B., Nirschl H. (2008). Assessment of the mixing efficiency of solid mixtures by means of image analysis. Powder Technology 182, 415-423.
- [7] Hausner H. H. (1967). Friction conditions in a mass of metal powder. International Journal of Powder Metallurgy 3, 7-13.
- [8] Carr R. L. (1965). Evaluating flow properties of solids. Chem. Eng. 18, 163-168.
- [9] Schulze, D. (1995). Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern- Definition und Messverfahren. Chemie-Ingenieur-Technik 67, 60-68.
- [10] Daumann B., Fath A., Anlauf H. and H. Nirschl. Determination of the Mixing Time in a discontinuous Powder Mixer (submitted in Chemical Engineering Science März 2008).
- [11] Pahl M., Sommer K. et. al. (1993). Mischen von Kunststoff- und Kautschukprodukten. VDI Verlag Kunststofftechnik, ISBN 3-18-234183-9.
- [12] Daumann B., Nirschl H. (2007). Einfluss der Mischtechnik auf trockene und feuchte Feststoffschüttungen, Influence of the mixing system on dry and moist bulk solids. AT Aufbereitungstechnik/Mineral Processing 48, 19-33.