

Optische Ermittlung der Mischgüte

Feststoffmischen im diskontinuierlichen Mischbetrieb



B. Daumann und H. Nirschl

In dem vorliegenden Beitrag wird über ein optisches Messverfahren zur Ermittlung des Mischgütevorganges beim Feststoffmischen berichtet. Ein Teil der zu mischenden Feststoffe wird dazu durch eine Tracerkomponente (Farbpigment) mit ähnlicher Korngröße ersetzt. Die Bestimmung des Mischgütevorganges, des Dispersionskoeffizienten und der optimalen Mischzeit erfolgt über eine Messung der Farbverteilung in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen.

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 Misch-

zeit zu erreichen. Die Veränderung der Mischgüte über der Mischzeit wird durch den Mischgütevorgang beschrieben. Die Bestimmung des Mischgütevorganges 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 Mischgütevorgang 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 Mischgütevorgängen bei unterschiedlichen Ausgangsbedingungen anstellen zu können. Die beschriebene Vorgehensweise ist bereits ausführlich in der verfügbaren Literatur dargestellt und diskutiert worden und untersucht worden [1, 2]. 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. Beinhaltet 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.

▼ Tabelle 1: Materialparameter der Modellmischung

Materialdaten	Grobgut	Mittelgut	Feingut
Feststoffdichte ρ_s	2.700 kg/m ³	2.700 kg/m ³	2.740 kg/m ³
Schüttdichte $\rho_{\text{Schütt.}}$	1.400 kg/m ³	1.400 kg/m ³	1.430 kg/m ³
Feuchte x_w	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %
Sphärität Ψ	0,76	0,67	0,74

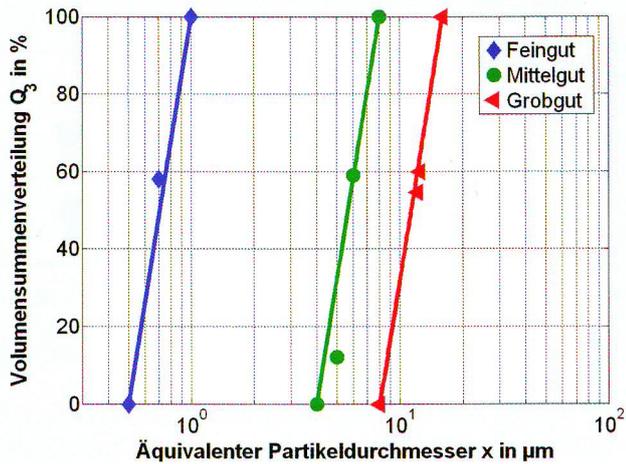


Abb. 1: Partikelgrößenverteilung der Modellmischung

Der in dieser Arbeit dargelegte Fortschritt für die Mischungsanalyse liegt in der Entwicklung einer Bildauswertungsmethode ohne Probenahme zur direkten Ermittlung von Konzentrationsverlauf und Mischgüteverteilung während des Mischvorganges im Mischapparat. Eine CCD-Videokamera registriert den Mischprozess während der gesamten Mischzeit, sodass 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 Mischers 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.

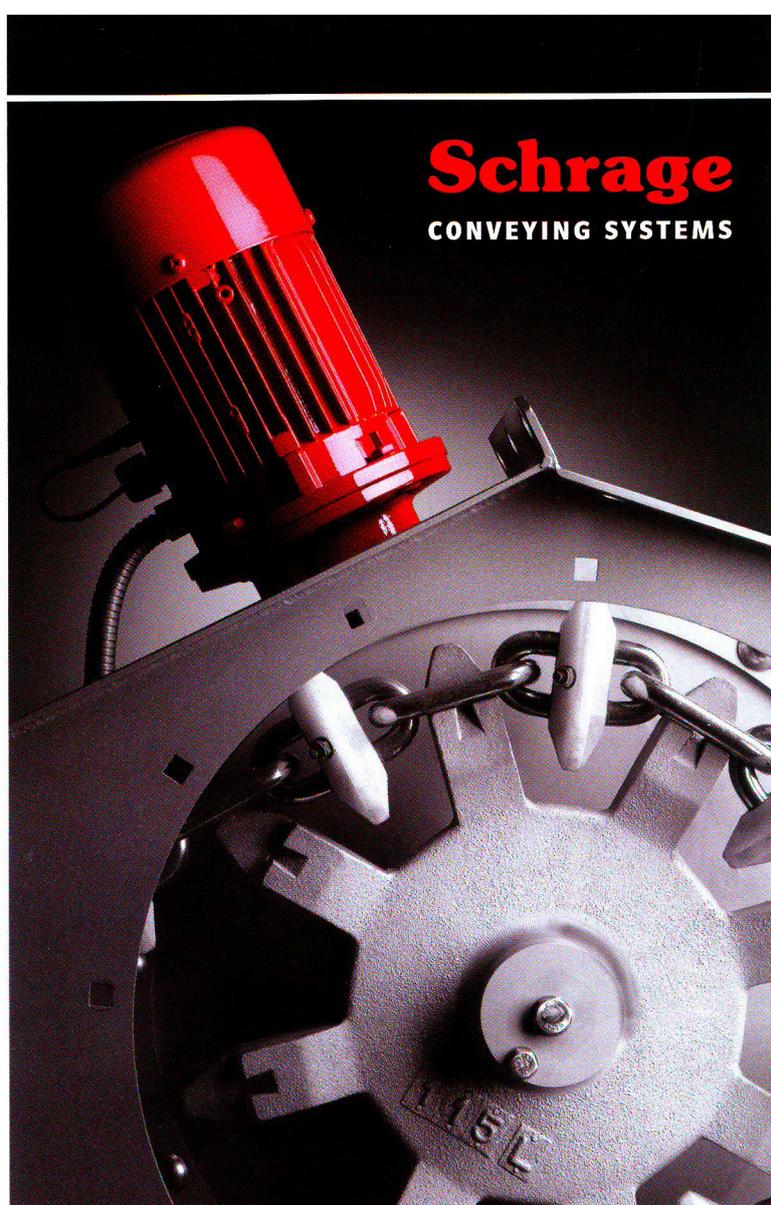
2 Materialien, Apparaturen und Messmethode

2.1 Bestandteil der Modellmischung

Bei den Untersuchungen wurden drei Fraktionen (Modellmischung) ausgewählt, die sich durch die Partikelgröße unterscheiden, nicht jedoch durch Feststoffdichte ρ_s , Schüttdichte $\rho_{\text{Schütt.}}$ und nur in relativ geringem Maße durch den Formfaktor Ψ . 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.

2.2 Produktcharakteristik des Tracers

Für die Mischversuche wurden spezielle farbige Partikel (Tracerpartikel) verwendet, welche im Mischaum 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, Fließeigenschaften etc.) durch die Einfärbung mit dem Pigment nicht unzulässig zu beeinflussen, wur-



Schrage
CONVEYING SYSTEMS

Sensibel. Aber unempfindlich.

Seit Jahrzehnten entwickelt und installiert Schrage aus Friedeburg unterschiedlichste Rohr- und Schachtkettenförderer – auch für die Lebensmittel- und Futtermittelindustrie. So sind in enger Zusammenarbeit mit Kunden mehr als 2000 effiziente Lösungen entstanden. Weltweit.

Testen Sie uns – schicken Sie uns Ihr Schüttgut. Wir testen den reibungslosen Ablauf in unserem Technikum.

**Besuchen Sie uns auf der easyFairs® Schüttgut
in Duisburg | 28. – 29.05.2008 | Stand B : 09**

	Ultramarinblau	Zement
Farbe	blau	grau
Feststoffdichte ρ_s	2.400 kg/m ³	2.900 kg/m ³
Partikeldurchmesser x_{10}	10,5 μm	2,4 μm
Partikeldurchmesser x_{50}	16,2 μm	13,5 μm
Partikeldurchmesser x_{90}	20,5 μm	82 μm
Hausner-Ratio H	1,41	1,45
Carr-Index C	29,3 %	31,4 %

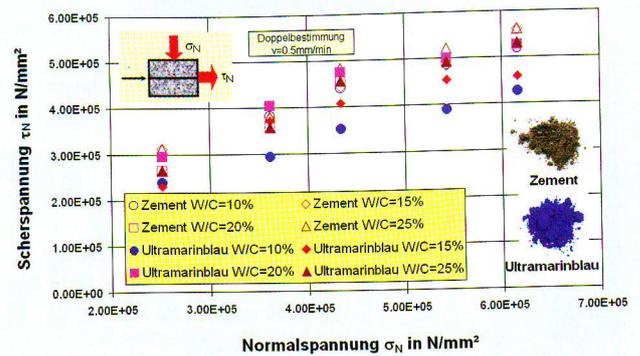
▲ Tabelle 2: Materialparameter des Tracers

de entsprechend einer Herstellerempfehlung ein Konzentrationsbereich von $\bar{c}_{p,E} = 0,5 \% - 1 \%$ (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 Partikelfraktionen im Bereich von 0,5 mm - 16 mm. 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, Sphärität 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 Mischaum verteilt.

Die Feststoffdichte ρ_s ist bei beiden Produkten in etwa die selbe. 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



▲ Abb. 2: Fließortbestimmung nach Jenike

Hausner-Ratio H und Carr-Index C bestimmbar [7, 8]. Diese Kennzahlen beschreiben das Verdichtungsverhalten von feinen Pulvern. Da der Hausner-Ratio $H \geq 1,15$ und der Carr-Index $C \geq 25 \%$ betragen, sind dies nach Definition beider Autoren Schüttgüter mit eingeschränktem Fließverhalten.

Die Bestimmung der Fließeigenschaften von trockenen und feuchten Feststoffen wurde nach der Auswertemethode von [9] in einer Jenike-Scherzelle durchgeführt. Die zugehörigen Messergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt. Der Fließort, der die Scherspannung τ_N über der Normalspannung σ_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 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. 3: Sicht auf den Mischaum des Zweiwellenlabormischer mit wendelförmigem Mischwerkzeug



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 Abb. 3, $V = 120$ 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 φ entspricht etwa $\varphi \approx 50$ %. Die Drehzahl n kann stufenlos bis 49 U/min eingestellt werden.

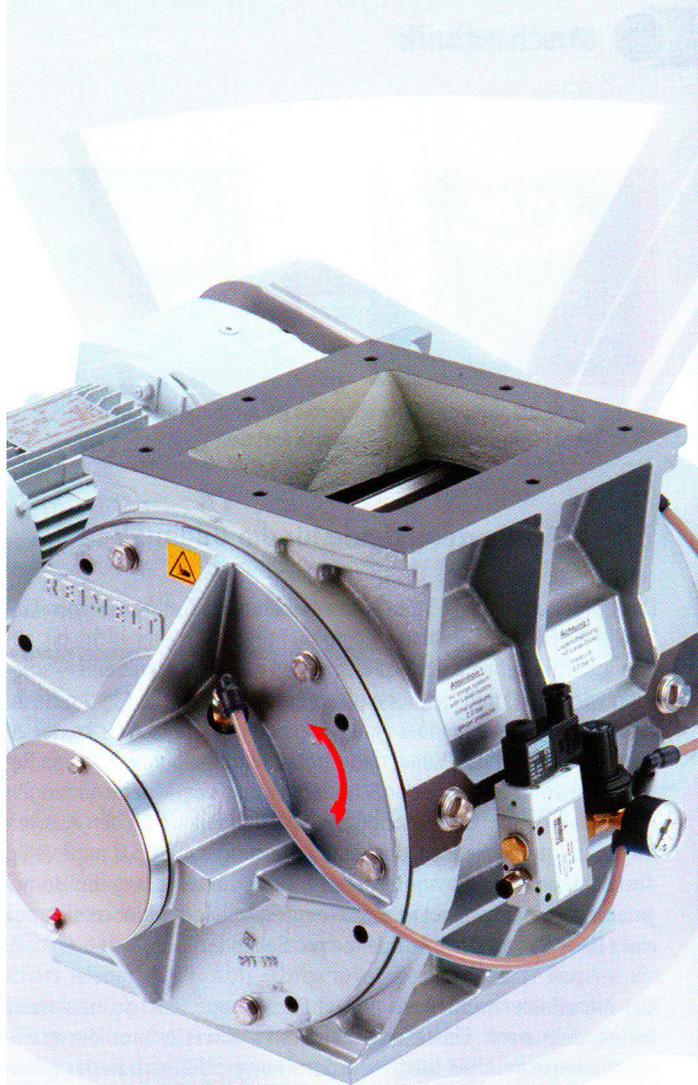
Das Auswerten von Bildern an der Oberfläche eines Mixers ist nur möglich, wenn eine ausreichende Zugänglichkeit für die Digitalkamera und die Lichtquellen zur Verfügung stehen. Die Schattenbildung durch das Mischwerkzeug und den Trogrand ist durch die Beleuchtung und eine optimale Positionierung der Kamera nach Abb. 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 $720 \text{ Pixel} \times 576 \text{ Pixel}$ mit einer Bildrate von 30 Bildern/s. Durch die senkrechte Positionierung der Videokamera über dem

Mischraum kann der Mischvorgang kontinuierlich beobachtet bzw. aufgezeichnet werden. Eine 1.000 W Halogenlampe leuchtet den Mischraum so aus, dass die Schattenbildung durch das Mischwerkzeug und den Trogrand nach Abb. 4 stark reduziert wird und die Fremdlichteinflüsse gering gehalten werden, sodass diese potenziellen Fehlerquellen bei der Auswertung außer Acht gelassen werden können.

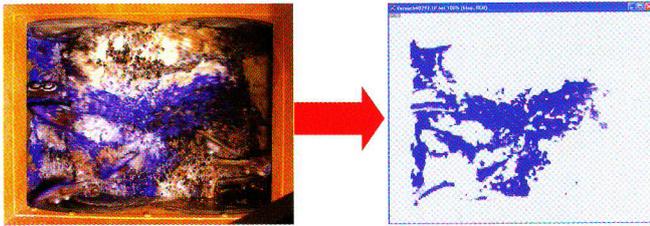
◀ Abb. 4:
Seitenansicht
der senkrecht
positionierten
Videokamera



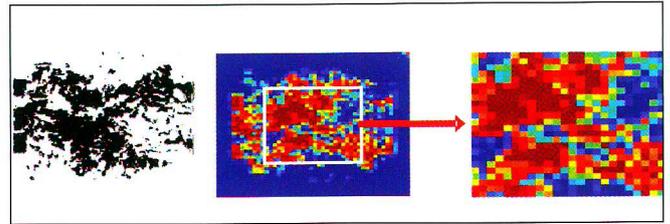
Dosieren und Austragen mit Know-how.

Alle Reimelt-Komponenten
für die Verfahrenstechnik
aus eigener Fertigung!





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



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

2.4 Auswertemethode für die Bildanalyse

Die aufgenommenen Digitalbilder haben eine Auflösung von 720 Pixel × 576 Pixel. Die blaue Komponente kann daher nicht bis zur Primärpartikelgröße aufgelöst werden. Es ist möglich, mit einer Auflösung von 366,8 mm² 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 mm² völlig ausreicht, um den Mischgüteverlauf zur Charakterisierung 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 Abb. 5a,b ist das Separationsverfahren der blauen Komponente dargestellt. Durch eine bildanalytische Verstärkung der Tracerfarbe nach Abb. 5b kann die Tracerkomponente separiert werden.

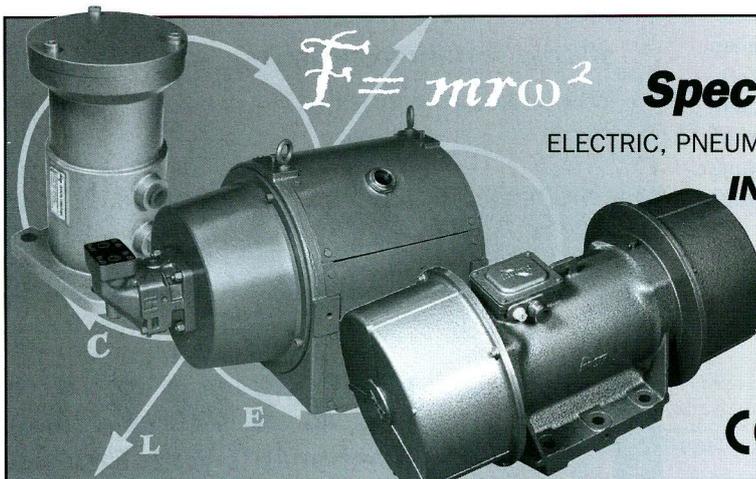
Die Bestimmung der Probenkonzentration $c_{p,i}$ und daraus, bei bekanntem Sollwert $\bar{c}_{p,E}$, die Errechnung der empirischen Varianz s^2 nach Gl. 1 erfolgt durch eine Aufteilung der Digitalbilder in einzelne Segmente (Abb. 6) mit Hilfe eines in [10] beschriebenen Auswertalgorithmus.

$$s^2 = \frac{1}{120} \cdot \sum_{j=0}^{120} (c_{p,i} - \bar{c}_{p,E})^2 \quad (1)$$

Die Segmente stellen eine Probenfläche A_p dar, die beim Zweiwel-lenmischer $A_p = 15 \text{ Pixel} \times 12 \text{ Pixel}$ entsprechen. Daraus errechnet sich eine Gesamtprobenmenge von $m_p \approx 2,8 \text{ g}$, was z. B. einer Tracerpartikelzahl von $2,3 \times 10^9$ entspricht. Für ein 720 Pixel × 576 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.

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 Gl. 2 enthält neben der Varianz des Messfehler σ_M^2 , der Zufalls Mischung σ_Z^2 , die Konzentrationsausgleichslänge L des Mischers, die Mischzeit t_M , die Masse des Einzelpartikels m_E , die Probenmenge m_p und die Varianz der Nullmischung σ_0^2 . 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,

$$s^2 = \sigma_Z^2 + \sigma_M^2 + \left[1 - \frac{m_E}{m_p} \right] \cdot \sigma_0^2 \cdot e^{-2 \cdot (\pi/L)^2 \cdot D \cdot t_M} \quad (2)$$



Specify **INVICTA** by name!

ELECTRIC, PNEUMATIC and HYDRAULIC powered vibrators from...

INVICTA, the name you can rely on.



INVICTA VIBRATORS



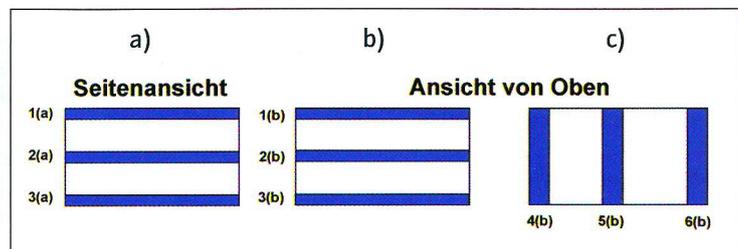
ISO 9001
Registered Firm

Harlaxton Road, Grantham, Lincolnshire NG31 7SF, England.
 Tel: +44 (0)1476 566301 Fax: +44 (0)1476 590145
 E-mail: sales@invictavibrators.co.uk www.invictavibrators.co.uk

horizontaler Aufgabort	vertikaler Aufgabort	
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) $51,4 \text{ cm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ cm}^2/\text{s}$

◀ Tabelle 3:
Dispersionskoeffizienten bei
Variation des Aufgabortes

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



3 Versuchsergebnisse und Diskussion

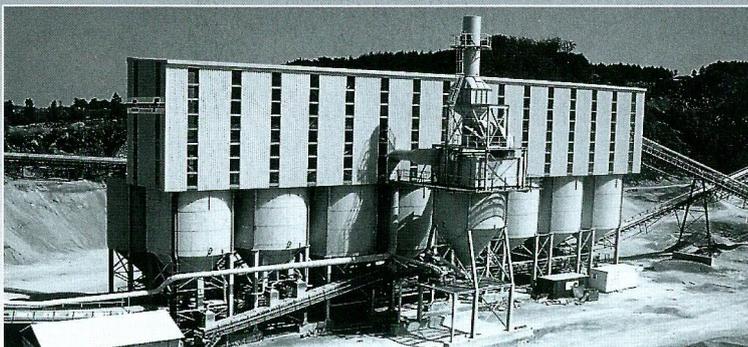
3.1 Versuchsdurchführung

Die Mischzeit hat einen Einfluss nach [11] auf die Drehzahl n , den Füllgrad φ , 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 Partikelfractionen 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 - 40 s in einem separaten Mischer befeuchtet und die gewünschte Feuchte bei allen drei Fraktionen der Modellmischung eingestellt. Die Einflussgrößen die variiert wurden, ist der Aufgabort der Tracerkomponente, die Drehzahl $n = 15 \text{ U}/\text{min}$ bis $35 \text{ U}/\text{min}$, die massenbezogene Feuchte von $x_w = 2,5$ bis 10% und der Feingutanteil in der Mischung.

3.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

Die Aufgabeviationen der Nullmischung mit Tracer sind in Abb. 7 dargestellt. Abb. 7a stellt einen horizontalen Schnitt durch den Mischer dar. Abb. 7b, c gibt einen Blick auf die Oberfläche des Mischers wieder. Nach Abb. 7b befindet sich der Tracer vertikal im Mischraum, jedoch ist die Aufgabe des Tracers senkrecht zur Mischerachse. Die Tracerkomponente nach Abb. 7c wurde parallel zur Mischerachse aufgegeben mit vertikaler Markierung zur Feststoffschüttung. 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 Gl. 2, eine um den Faktor vier kürzere Mischzeit.

In Abb. 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



Kies-/Schotter-Siloanlagen

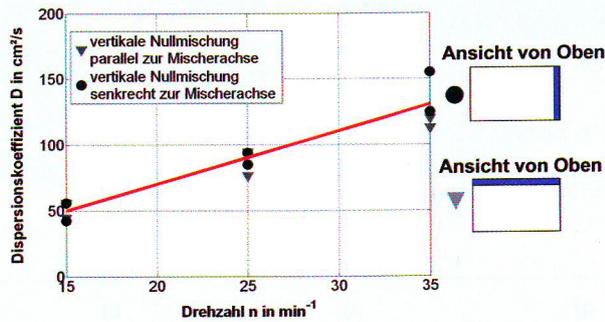


SIT-Reihen-Siloanlagen werden überall dort eingesetzt, wo unterschiedliche Kornfraktionen zu lagern oder aufzubereiten sind.

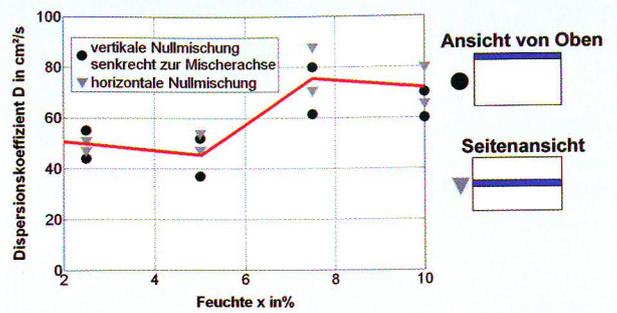
Wir bauen seit vielen Jahren Norm-Silos in geschraubter oder geschweißter Ausführung mit unterschiedlichsten Konus-Neigungen, bis zu ca. 1000 m³ Inhalt.

Sprechen Sie mit uns, besuchen sie uns im Internet oder fragen sie nach detaillierten Unterlagen.

SILOBAU-THORWESTEN GmbH · D-59 269 Beckum · Daimlerring 39
Tel. 02521/9333-0 · Fax 02521/9333-33 · www.thorwesten.com · sit@thorwesten.com



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



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

te des Schüttgutes ist bei den durchgeführten Versuchen $x_W = 5\%$. 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 $n = 15\text{ U/min}$ auf $n = 35\text{ U/min}$ um den Faktor von etwa 2,6.

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 ca. 1,7. Die Ursache für die konstanten Bereiche bei niedrigen Feuchten ist darin zu begrün-

STAG

moves!

Schüttguttechnik
Pneumatische und mechanische Förder-
technik, Siliertechnik

Ihr Partner für Lösungen
im Schüttgut-Handling

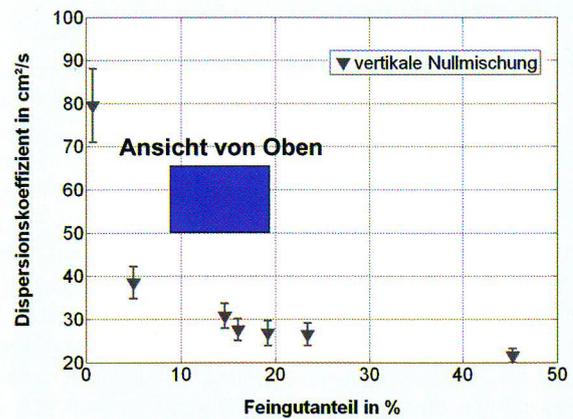
Besuchen Sie uns an der easyFairs Schüttgut in Duisburg - Stand B-23A

STAG AG, Industriestrasse 11, CH-7304 Maienfeld, Tel: +41 (0)81 303 58 00, Fax: +41 (0) 81 303 58 99, www.stag.net



den, 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.

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, sodass 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 Abb. 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 Ober-



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

fläche zur Verfügung steht, die mit Wasser benetzt werden muss, bis die Mischung fließfähig wird.

Die Abb. 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.

Braunkohleabbau im Rheinland, Sand- und Kiesgruben in Osteuropa, Getreidespeicher in den USA ...
Gurtförderanlagen mit unseren Tragrollen sind weltweit im Einsatz – auch unter extremsten Bedingungen.

$$L_{10h} = \frac{106}{60 \cdot n} \cdot L_{10h} = \left(\frac{16666}{n} \right) \cdot \left(\frac{P}{C} \right)^p$$

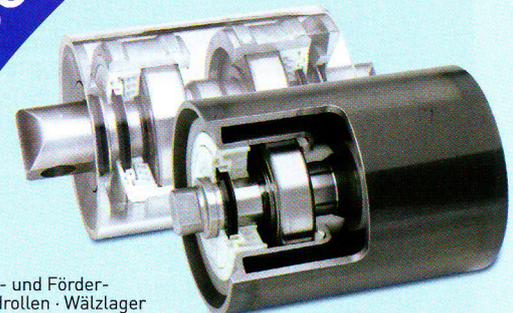
Berechenbare Effizienz.

Mit Unterstützung unseres Berechnungs-Programms QNK-Pro© entwickeln wir optimale Lösungen:

- minimaler Energieverbrauch
- Lebensdauerverlängerung von Tragrollen/ Girlanden im Ober- und Untertrum
- Reduzierung der Schallemission
- bestmögliche Einsatzbedingungen für den Gurt

Informationen unter www.kuepper.eu

BEWEGUNG FORTSCHRITT TECHNOLOGIE



Trag- und Förderbandrollen · Wälzlager



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 Mischgüterverlauf 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 Aufgabebet 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.

Danksagung

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

Symbole

C	Carr-Index	[%]
$\bar{c}_{P,E}$	Sollwert Pigmentkonzentration	[-]
$c_{P,i}$	Pigmentkonzentration einer Probe i	[-]
D	Dispersionskoeffizient	[m ² /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	[s ⁻¹]
N_p	Anzahl der Proben	[-]
Q_3	Volumenverteilung	[%]
V	Volumen des Mixers	[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

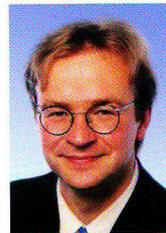
φ	Füllgrad	[-]
ρ_s	Feststoffdichte	[kg/m ³]

Die Autoren



B. Daumann

Seit 2006 ist Dipl.-Ing. Björn Daumann Doktorand am Lehrstuhl Verfahrenstechnische Maschinen an der Technischen Hochschule (TH). Er studierte Verfahrenstechnik bis 2004 an der Fachschule Mannheim. Danach studierte er in einem Zweitstudium Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH). In seiner Promotion beschäftigt er sich mit dem Feststoffmischen von Schüttgütern mit Partikeln im grob- bis feindispersen Größenbereich.



H. Nirschl

Prof. Dr.-Ing. Hermann Nirschl ist seit 2002 Leiter des Lehrstuhl Verfahrenstechnische Maschinen an der Technischen Hochschule (TH) Karlsruhe. Der Schwerpunkt seiner Arbeitsgruppe liegt in der Untersuchung von partikulären System und deren Anwendung. Typische Prozesse sind die Separation, das Mischen und die Zerkleinerung von Partikeln. Hierfür stehen am Institut mehrere Partikelmessverfahren (TEM, REM, SAXS, PCS...) und Simulationsprogramme zur Charakterisierung der partikulären Systeme und zur Entwicklung von neuen Technologien zur Verfügung.

Dipl.-Ing. Björn Daumann

Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

Straße am Forum 8
76128 Karlsruhe

Tel.: 0 721/608 - 41 39

Fax: 0 721/608 - 24 03

E-Mail: bjoern.daumann@mvm.uka.de

Internet: www.mvm.uni-karlsruhe.de

Prof.-Dr.-Ing. Hermann Nirschl

Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe (TH)

Straße am Forum 8
76128 Karlsruhe

Tel.: 0 721/608 - 24 04

Fax: 0 721/608 - 24 03

E-Mail: hermann.nirschl@mvm.uni-karlsruhe.de

Internet: www.mvm.uni-karlsruhe.de

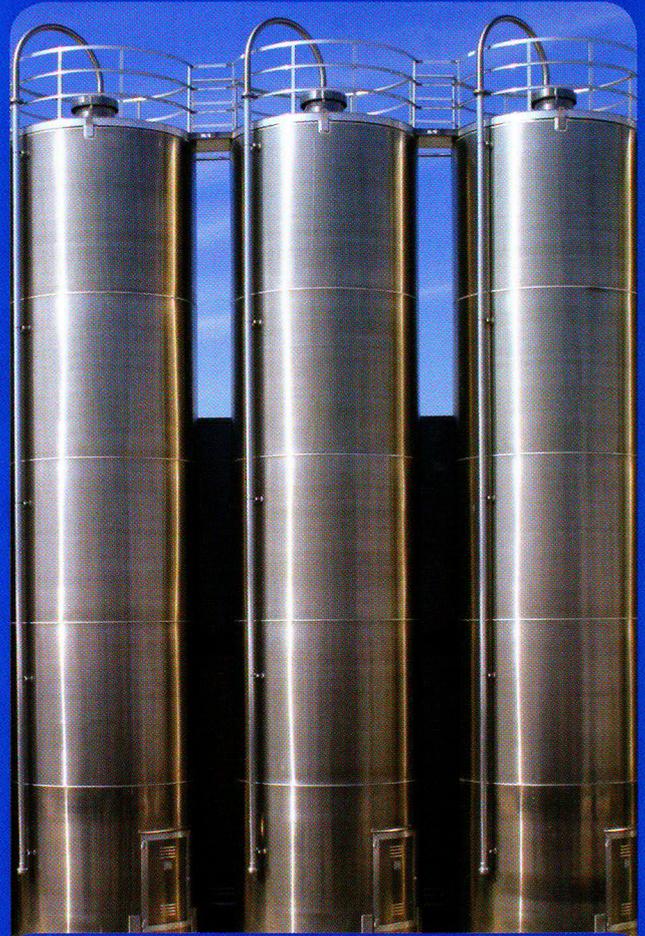


σ_N	Normalspannung	[N/mm ²]
σ^2	Varianz	[-]
σ_0^2	Varianz der Nullmischung	[-]
$\sigma_{\text{Syst.}}^2$	Systematische Varianz	[-]
σ_M^2	Varianz des Messwertes	[-]
σ_Z^2	Varianz der gleichmäßigen Zufallsmischung	[-]
τ	Scherspannung	[N/mm ²]
Ψ	Sphärizität	[-]

Literatur

- [1] Raasch J., Elsässer B.: Vergleich der Mischgüte eines Durchlaufmischers mit der eines Chargenmischers; Schüttgut 1 (1995) S. 497 - 503.
- [2] Hauser G., K. T., Sommer K.: Bestimmung der Mischzeit eines Schaufelmischers mit Schnellentleerung für die Herstellung von Trockenmörtel und Putz; AT Aufbereitungstechnik/Mineral Processing 30 (1989) S. 367 - 374.
- [3] Koch T., H. G., Zettl T. und Sommer K.: Mischzeitbestimmung an einem horizontalen Einwellenmischer; Schüttgut 2 (1996) S. 67 - 72.
- [4] Collin, P. und Jezequel, H.: Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects. Cement and Concrete Research 7 (2007) p. 1321 - 1333.
- [5] Lee H.-S., J.-Y.L. and Yu M.-Y.: Influence of inorganic pigments on the fluidity of cement mortars; Cement and Concrete Research 35 (2005) p. 703 - 710.
- [6] Daumann B., Nirschl H.: Assessment of the mixing efficiency of solid mixtures by means of image analysis; Powder Technology 182 (2008) p. 415 - 423.
- [7] Hausner H. H.: Friction conditions in a mass of metal powder; International Journal of Powder Metallurgy 3 (1967) p. 7 - 13.
- [8] Carr R. L.: Evaluating flow properties of solids; Chem. Eng. 18 (1965) p. 163 - 168.
- [9] Schulze, D.: Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern – Definition und Messverfahren; Chemie-Ingenieur-Technik 67 (1995) S. 60 - 68.
- [10] Daumann B., Fath A., Anlauf H. and Nirschl, H.: Determination of the Mixing Time in a discontinuous Powder Mixer (submitted in Chemical Engineering Science März 2008).
- [11] Pahl M., Sommer K. et. al.: Mischen von Kunststoff- und Kautschukprodukten; VDI Verlag Kunststofftechnik (1993) ISBN 3-18-234183-9.
- [12] Daumann B., Nirschl H.: Einfluss der Mischtechnik auf trockene und feuchte Feststoffschüttungen; AT Aufbereitungstechnik/Mineral Processing 48 (2007) S. 19 - 33. ■

Storage Solutions



Lagersilos
Mischsilos
Homogenisiersilos
Mehrkammersilos
Einstecksilos
Explosionsgeschützte Silos
Tanks, Container, Behälter

High Quality Silo Solutions

P+W METALLBAU 

P+W Metallbau GmbH & Co.KG
 Dieselstraße 20
 D - 88074 Meckenbeuren
 +49 (0) 75 42 - 94 20 0
www.pw-metallbau.de

Besuchen Sie uns:

Powtech Halle 7, Stand 7 - 449
Fakuma Halle B3, Stand B3-3007