



Doctoral Thesis

Kontinuierliches Mischen feiner Feststoffe in fluid-dynamischen Fallrohrmischern

Author(s):

Eichstädt, Olaf

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001895603> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 12345

KONTINUIERLICHES MISCHEN
FEINER FESTSTOFFE
IN FLUID-DYNAMISCHEN FALLROHRMISCHERN

ABHANDLUNG

Zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

OLAF EICHSTÄDT

Dipl.-Ing. (RWTH Aachen)
geboren am 3. Januar 1967
von Kiel (Deutschland)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. L. Reh, Referent
Dr. M. Mächler, Korreferent
Dr. R. Weinekötter, Korreferent

Zürich 1997

Zusammenfassung

Die Grundoperation des Mischens ist Bestandteil vieler feststoffverarbeitender Verfahren. Die Mehrzahl der konventionellen Feststoffmischer vergrössert die Homogenität des zu mischenden Gutes dadurch, dass Teile einer Feststoffschüttung mit mechanischen Werkzeugen oder durch die Einwirkung von Druckluft gegeneinander verschoben werden. Die dabei auftretenden hohen Feststoffvolumenkonzentrationen bedingen durch den intensiven Kontakt der Partikeln eine eingeschränkte Beweglichkeit, so dass die für das Erzielen einer ausreichenden Homogenität benötigten spezifischen Energien für Chargenmischer im Bereich von 1-10kJ/kg liegen. Für kontinuierliche Mischer sind die spezifischen Mischenergien um etwa eine Grössenordnung niedriger, da in kleineren Mischbehältern entlang kürzerer Mischwege eine effiziente Vermischung innerhalb einer kürzeren Misch- oder Verweilzeit erfolgen kann. Kontinuierliche Mischer werden vorteilhaft in kontinuierliche Prozesse integriert, wobei darauf geachtet werden muss, dass die zugeführten Eduktströme eine im Vergleich zur mittleren Verweilzeit des Mixers ausreichende Kurzzeitkonstanz aufweisen.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie mit einem neuartigen fluid-dynamischen Verfahren kurzzeitkonstante Dosiermassenströme feiner Partikel ($d_{50,3} < 100\mu\text{m}$) unter Nutzung ihrer potentiellen Energie¹ effizient vermischt werden können. Dabei spielt das sich in momentanen und lokalen Entmischungsvorgängen äussernde stochastische Verhalten von Gas-Feststoff-Strömungen feiner Partikel eine entscheidende Rolle: Wird Feststoff in ein am Kopf und entlang seiner Länge gasdicht geschlossenes, senkrecht Rohrdosiert, so bildet sich durch den zwischen dem fallenden Feststoff und der ihn umgebenden Luft stattfindenden Impulsaustausch ein axiales Profil des entlang der Fallstrecke ansteigenden statischen Gasdrucks aus. Im Zusammenspiel mit der sich momentan und lokal entmischenden Gas-Feststoff-Strömung wird eine chaotische Gasrückströmung ermöglicht, von der der fallende Feststoff intensiv verwirbelt wird.

Die experimentelle Untersuchung der Strömung sowie des Mischverhaltens wurde in 1.2m langen Fallrohren mit Querschnitten zwischen 4 und 34cm² durchgeführt. Dabei wurden zwischen 36 und 360kg/h weisses Aluminiumhydroxid mit einem mittlerem Korndurchmesser zwischen 30 und 100 μm mit 0.18 bis 1.8kg/h eines russhaltigen Toners ($d_{50,3} = 10\mu\text{m}$) entsprechend einem

¹ ca. 10J je kg und Meter Fallstrecke

II

Massenanteil von etwa 0.5% gemischt. Die Zusammensetzung der in den fluid-dynamischen Fallrohrmischern hergestellten Mischungen wurde am Mischeraustritt mit einer einfachen optischen Reflexlichtsonde mit einer zeitlichen Auflösung von 10Hz und einer optischen Probengrösse von 30-50mg gemessen.

Für den Feststoff ergaben sich im Betrieb mittlere Verweilzeiten unter 3s, die mit wachsendem Durchsatz bis auf etwa 0.5s abnahmen. Die sich dabei einstellende mittlere Feststoffvolumenkonzentration $\bar{\varphi}$ lag zwischen 0.1 und 10%. Homogene Mischungen mit einem Variationskoeffizient der in den Mischungen auftretenden Konzentrationsschwankungen von etwa 5% wurden für mittlere Feststoffvolumenkonzentrationen $\bar{\varphi}$ um 1% erzeugt. Für grössere $\bar{\varphi}$ bei grossen Durchsätzen in kleinen Mixern sowie für lokale Strahlenbildung in grossen Mixern nahm die Inhomogenität der hergestellten Mischungen zu. Die erzielten Mischgüten sind mit den von *Weinekötter* (1993) in konventionellen kontinuierlichen Mixern beobachteten vergleichbar. Die Vielzahl der von der optischen Messmethode gelieferten Messwerte bietet sich für eine Strukturanalyse der Mischungen mit Hilfe des Leistungsdichtespektrums der Konzentrationszeitreihen an. Die Spektren wiederum lassen sich mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse vergleichen, so dass eine automatische Erkennung anormaler Betriebszustände möglich wird.

Ein Vergleich von Mixern mit unterschiedlichen Strömungsquerschnitten deutet darauf hin, dass der Querschnitt eines fluid-dynamischen Fallrohrmischers nicht beliebig vergrössert werden kann, da die Intensität des Impulsaustauschs zwischen Gas und Feststoff durch grossräumige Entmischung der Strömung abnimmt, die zu überbrückenden lateralen Mischwege jedoch grösser werden. Allerdings lässt sich durch Einbauten in der Fallstrecke der Feststoff besser über den Mischerquerschnitt dispergieren und eine Ausbildung grossräumig entmischter Zonen der Gas-Feststoff-Strömung unterdrücken.

Die Vorhersage des Betriebsverhaltens, insbesondere der mittleren Verweilzeit des Feststoffs, bei gegebenem Mischer, Stoffsystem und Durchsatz scheitert daran, dass das Widerstandsverhalten der Partikel in einer stochastischen Gas-Feststoff-Strömung heute noch nicht beschrieben werden kann. Um diese Lücke zu schliessen, müssen in Zukunft schnelle und lokale Messungen der Partikel- und Gasgeschwindigkeit durchgeführt werden, für die zur Zeit jedoch in dichten Gas-Feststoff-Strömungen die geeigneten Messverfahren fehlen.

Das fluid-dynamische Mischverfahren ist insbesondere geeignet für die in der Praxis als schwierig geltende Aufgabe, geringe Mengen eines Wirk- oder Wertstoffes mit einer grossen Menge eines anderen Materials schonend, schnell und effizient zu vermischen.

Summary

Many fine particle processes involve the mixing of solids as a necessary process step. The majority of today's solids mixers increase the homogeneity of the feed materials by relocating parts of the bulk solids in the mixer by means of mechanical devices or compressed air. Under these conditions, solids volume fractions are such that the mobility of individual particles is impeded by the close proximity of the particles and the frictional forces during particle-particle contacts. Consequently, the specific energy required for mixing in batch-mixers is in the range of 1-10kJ/kg. Continuous mixers are more compact and allow mixing to take place in reduced periods of time along shorter distances within the mixer. The required specific mixing energy is thus reduced by about an order of magnitude. Continuous mixers can be advantageously integrated into continuous processes, provided that fluctuations of the feed streams are sufficiently fast in comparison to the mean residence time of the particles within the mixer.

The present work investigates a novel fluid-dynamic approach to efficiently mix time-constant feed streams of fine ($d_{50,3} < 100\mu\text{m}$) particles using but their potential energy². This approach relies on the fact that fine particles in gas-solids flow tend to segregate both momentarily and locally in a random fashion: if particles are metered into a vertical tube that is sealed against the entrainment of air at the top and along the line of fall, momentum exchange between falling particles and the air within the mixer will create an axial profile of static gas pressure with pressure increasing from top to bottom. Due to the segregating nature of the two phase flow within the tube, bursts of air rise against the falling flow of solids, causing both axial and lateral dispersion of the particles.

An experimental investigation of both fluid-dynamics and performance of fluid-dynamic mixers was carried out using drop tubes 1.2m in length and with cross-sectional areas between 4 and 34cm². Between 36 and 360kg/h of white aluminium-hydroxide with mean particle diameter between 30 and 100 μm was mixed with 0.18 to 1.8kg/h of a carbon toner ($d_{50,3} = 10\mu\text{m}$) corresponding to a mass fraction of 0.5%.

Mixture composition was assessed at the mixer exit using a simple optical probe which measured the amount of NIR-radiation at 960nm which was reflected by

² about 10J per kg and meter of mixer length

IV

the mixture present in front of the probe. The optical sample size was between 30 and 50mg, the sample frequency was 10Hz.

Mean solids residence times were below 3s and decreased with increasing throughput to about 0.5s. Mean solids volume fractions $\bar{\varphi}$ under these conditions were between 0.1 and 10%. Homogeneous mixtures were obtained and the coefficient of variation of the toner mass fraction was in the vicinity of 5% when operating conditions yielded mean solids volume fractions $\bar{\varphi}$ of about 1%. Mixture homogeneity decreased for high throughputs in small mixers and when compact strands of quickly accelerating particles were present in large mixers. In total, the obtained mixture quality was in the same range as observed by *Weinekötter* (1993) for conventional solids mixers. As the optical method used for mixture analysis provided concentration measurements at a comparably high frequency, it was possible to use spectral analysis to describe the concentration time series. The spectra themselves were subjected to principle component analysis (PCA) to identify common structures and abnormal operating conditions.

A comparison between fluid-dynamic mixers of different sizes yielded some evidence that the cross-sectional area of fluid-dynamic mixers cannot be increased arbitrarily: for an increase of cross-sectional area, the intensity of momentum exchange decreases mainly due to the onset of large scale segregation of the gas-solids flow. At the same time, lateral distances grow and it becomes increasingly difficult to achieve a homogeneous mixture. To a certain extent, inserts in the line of fall can be used to enhance dispersion of the falling particles and to impede large scale segregation of gas and falling solids.

At present, operating conditions for fluid-dynamic mixers for a given mixer, given feed materials and given throughput cannot be predicted due to the lack of knowledge regarding the drag behaviour of particle clusters in the randomly segregating gas-solids-flow. To close this gap, fast local measurements of gas and solids velocity will have to be conducted in the future. Up to now, no devices are available that can be used to measure these quantities under the encountered conditions of dense gas-solids-flow.

The novel fluid-dynamic approach for the mixing of fine solids is especially suitable for applications where a small quantity of an active or valuable component needs to be mixed with a large stream of material.