

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 112 (1994)
Heft: 50

Artikel: Verfahrenstechnische Gestaltung von Feststoffprozessen - kontinuierliches Mischen
Autor: Weinekötter, Ralf / Reh, Lothar
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78575>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 27.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Verfahrenstechnische Gestaltung von Feststoffprozessen – kontinuierliches Mischen

Feststoffe werden in der Grundstoff-, Baustoff-, Nahrungsmittel-, Futtermittel-, Keramik-, Chemie-, Waschmittel-, Kunststoff- und Pharmaindustrie, aber auch in der heimischen Küche gemischt. Der Wert der eingesetzten Feststoffe kann sehr niedrig, aber auch ausserordentlich hoch sein. Abmessungen der Feststoffpartikel schwanken vom Submikron- bis in den Zentimeterbereich. Trotz der breiten Anwendung von Mischverfahren in Feststoffprozessen bestehen noch grosse Kenntnislücken beim Feststoffmischen.

Mischen vereinigt getrennt vorliegende Stoffe. Ähnlich wie bei den Umkehrverfahren des Mischens, den Trennver-

VON RALF WEINEKÖTTER,
REGENSDORF, UND
LOTHAR REH, ZÜRICH

fahren, die vom mechanischen Sieben von Feststoffen bis zur thermischen Destillation von Flüssigkeiten reichen, ist die Fülle der Mischaufgaben ausserordentlich gross. Mischen bzw. Mischverfahren dienen dazu, Unregelmässigkeiten oder Gradienten bezüglich der Zusammensetzung, Eigenschaften oder Temperatur in einer Materialmenge zu reduzieren [1]. Eine Vermischung tritt ein, wenn Teile aus dieser Gesamtmenge bewegt werden oder sich bewegen.

Die Einteilung der verschiedenen Mischsysteme erfolgt üblicherweise nach der vorherrschenden Phase (Bild 1). Sie reichen vom einphasigen Fluidmischen (Fluid: Gas, Flüssigkeit), von Gasen mit Flüssigkeiten (Dispergieren,

Zerstäuben), Feststoff und Flüssigkeiten/Gasen (Fluidisieren, Suspendieren) zum reinen Feststoff/Feststoff-Mischen. Zum Feststoffmischen werden auch Systeme gezählt, die nur einen geringen Flüssigkeitsanteil besitzen und bei denen die Flüssigkeit nach dem Mischvorgang an den Feststoff adsorptiv gebunden ist (Benetzen, Befeuchten). Nimmt der Flüssigkeitsanteil zu, spricht man vom Kneten. Bei hohen Viskositäten und plastischer Verformung des Mischgutes müssen sehr hohe Scherkräfte zur Vermischung aufgebracht werden. Hier werden Kneter, Innenmixer oder die kontinuierlich betriebenen Extruder eingesetzt. In 2-Phasen-Systemen vergrössern Trägheits- und Scherkräfte die in Kontakt tretenden Oberflächen; dies zeigt, dass eine Hauptanwendung des Mischens nicht die Dispergierung des Feststoffs oder eines Gases in der fluiden Phase an sich ist, sondern dass sie auch der Verbesserung von Stoff- und Wärmeaustausch dient.

Durch schlechte oder falsch dimensionierte Mischprozesse entsteht allein in den USA jährlich ein Schaden von 1–10 Milliarden Dollar [2], der in mangelnder Produktqualität oder zu hohem Aufwand (Overmixing) spürbar wird. Overmixing wird hervorgerufen durch eine zu lange Mischzeit und übermässigen Leistungs- bzw. Energieeintrag beim Erstellen einer Mischung. Dies führt zu einer erhöhten Beanspruchung des Mischgutes, die sich bei empfindlichen Produkten nachteilig auf die Qualität auswirkt. Des weiteren müssen grössere oder mehr Apparate eingesetzt werden als bei einer optimalen Gestaltung des Mischprozesses nötig wäre.

Bei der Analyse eines Mischverfahrens müssen folgende drei Fragen beantwortet werden:

- Wie gut ist die Mischung?
- Wie schnell wird dieser Mischungszustand erreicht?
- Wie hoch ist der erforderliche Leistungseintrag?

Das Feststoffmischen nimmt eine Sonderstellung im Gebiet der Mischtechnik ein, da die Beantwortung dieser drei Fragen für Feststoffmischprozesse bis heute nur experimentell erfolgen kann. Die Sonderstellung ist in den schwierig zu erfassenden Stoffparametern begründet. Welches sind die Grössen, die die Mischfähigkeit eines Pulvers beschreiben?

Misch- und Entmischungsvorgänge bei Feststoffen

Um Feststoffe zu mischen, müssen Partikel sich bewegen oder bewegt werden. Der Mischvorgang kann schematisiert

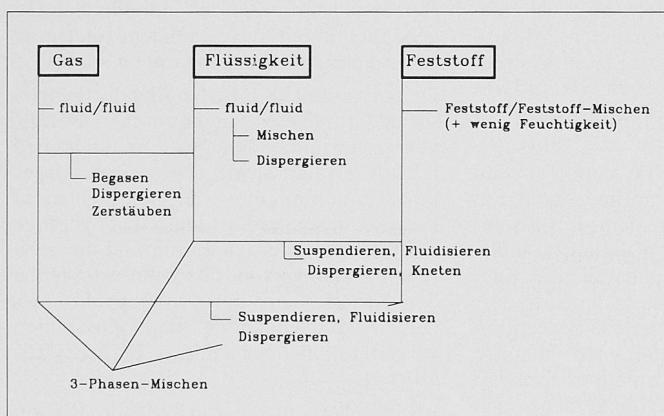


Bild 1. Vielseitigkeit der Mischaufgaben

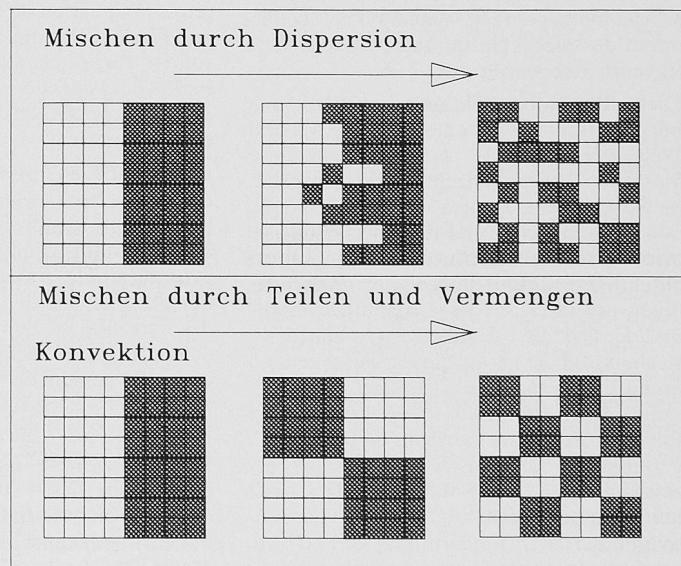


Bild 2. Mechanismen des Feststoffmischens

als Überlagerung von Dispersion und Konvektion betrachtet werden (Bild 2).

Unter Dispersion werden vollkommen zufällige Platzwechsel der einzelnen Partikel verstanden. Dispersion ist ein lokaler Effekt (Mikromixing), der beim bereits vorgemischten System, bei dem sich viele Partikel unterschiedlicher Komponenten in Nachbarschaft befinden, wirksam wird und eine Feinvermischung auf kleinstem Raum herbeiführt. Liegen die Komponenten zu Beginn räumlich getrennt vor, würde eine Vermischung allein durch Dispersion sehr viel Zeit benötigen, da die Anzahl der andersartigen «Nachbarn» sehr klein ist. Der Dispersion entspricht die Diffusion bei Fluidmischungen; im Gegensatz zur Diffusion ist bei der Dispersion aber kein Konzentrationsgradient Ursache der Vermischung, sondern eine erzwungene Bewegung, beispielsweise durch rotierende Werkzeuge, führt zu den zufälligen dispersiven Mischvorgängen.

Rotierende Werkzeuge verschieben grössere Partikelgruppen relativ zueinander (Konvektion). Die gesamte Materialmenge wird fortlaufend geteilt und nach einem Platzwechsel wieder vermengt (Makromixing), und so wird die Grösse der Gruppen, die nur aus einer Komponente bestehen und daher vollständig ungemischt sind, fortlaufend vermindert (Bild 2).

Wenn sich die Komponenten der Mischung in ihrem Bewegungsverhalten unterscheiden, ist dem Mischvorgang eine Entmischung überlagert, die die Erstellung einer idealen Zufallsmischung verhindert. Dies trifft für einen Grossteil der industriellen Feststoffgemische zu. Im Mischer selbst wird sich ein Beharrungszustand zwischen Mischung und Entmischung einstellen. Dieser Beharrungszustand und damit die Qualität der Mischung wird stark von der Mischerbauart bestimmt. Je doch bereits beim Entladen der Mischung sowie beim weiteren Handling, Transport und bei der Speicherung besteht Entmischungsgefahr.

Die Ursachen der Entmischung sind bis heute nur teilweise verstanden. Das liegt daran, dass das Bewegungsverhalten von vielen Partikeleigenschaften wie Grösse, Form, Dichte, Oberflächenrauhigkeit, Anziehungskräfte, Reibung u. a. beeinflusst wird. Nach Williams [3] hat jedoch die Partikelgrösse den dominierenden Einfluss auf die Entmischung. Da nahezu alle industriellen Pulver eine Partikelgrössenverteilung besitzen und derart als Feststoffmischungen von Partikeln unterschiedlicher Grösse betrachtet werden können, ist Entmischung ein charakteristisches Problem der Verfahrenstechnik von Feststoffen. Bild 3 zeigt schematisch Entmischungsmechanismen.

Qualität einer Pulvermischung – Mischgüte

Um die Effizienz eines Feststoffmischers zu beurteilen, ist eine quantitative Erfassung des Mischungszustandes notwendig. Hierzu muss festgelegt werden, welches Merkmal die Mischung charakterisiert. Dieses Merkmal ergibt sich aus dem Ziel des Mischungsvorganges, welcher beispielsweise eine gleichmässige Verteilung der Komponenten (Zusammensetzung) oder eine einheitliche Temperatur in der Materialmenge erreichen soll. Unter Umständen kann eine gute Vermischung bezüglich mehrerer Merkmale gefordert sein, z. B. Zusammensetzung und Partikelgrösse. Klassischerweise erfolgt eine Überprüfung des Mischungszustandes durch Entnehmen einer Anzahl gleichgrosser Proben. Diese Proben werden daraufhin untersucht, wie breit das Merkmal zwischen den Proben streut. Diese Streuung wird meist durch die Varianz σ^2 des Merkmals in den Proben charakterisiert. Die Varianz σ^2 wird daher häufig als Mischgüte definiert (Bild 4). Hierbei charakterisiert ein hoher Wert der Varianz eine breite Streuung des Merkmals, also eine schlechte Mischung. Mit Fortschritten in der Computer- und Analysetechnik stehen zunehmend schnelle On-line-, In-line- oder In-situ-Verfahren zur Bestimmung der Mischqualität zur Verfügung. Dann ist eine raffiniertere Analyse des Mischungszustandes mit modernen Methoden der Frequenzanalyse [4] möglich, mit dem Leistungsdichtespektrum (Bild 4).

Bei der Beurteilung einer Feststoffmischung ist das Volumen oder die Menge wesentlich, in der die Mischung möglichst homogen sein soll. Die Probengrösse stellt somit die Auflösung dar, mit der eine Mischung beurteilt werden kann. Je kleiner die Probengrösse, um so schärfer wird der Mischungszustand analysiert. Bei gleichem Mischungszustand wird mit kleinerer Probengrösse der numerische Wert für die Varianz als Mischgüte höher. Deswegen können nur Mischgüten verglichen werden, die auf gleichen Probengrössen beruhen. Dies wird in der Praxis häufig übersehen. Eine sinnvolle Festlegung der Probengrösse kann nur im Zusammenhang mit der weiteren Verwendung der Mischung geschehen. Beispielsweise muss in der Pharmazie gewährleistet sein, dass die Wirkstoffkomponente gleichmässig auf die einzelnen Tabletten einer Produktionscharge verteilt ist. Bei der Kontrolle des Mischungszustandes ent-

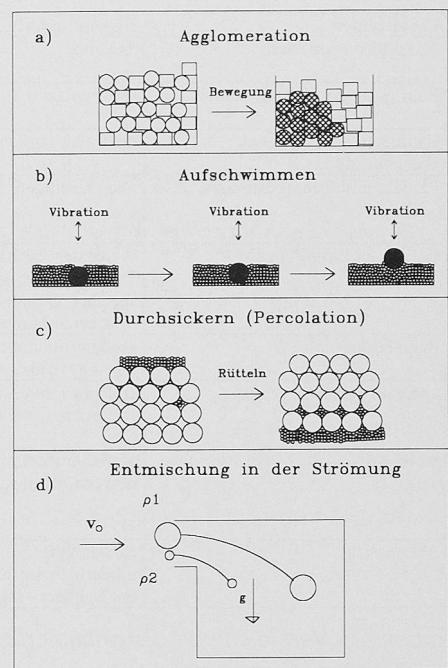


Bild 3. Schematische Darstellung der Mechanismen beim Entmischen von Feststoffgemischen

spricht die Probengrösse gerade einer Tablette. Weniger kritisch ist dies in der Grundstoffindustrie, wo Probengrösse auch in Tonnen gemessen sein kann.

Vergleich kontinuierlicher und diskontinuierlicher Mischverfahren für Feststoffe

Die Mehrzahl der industriellen Feststoffmischungen werden absatzweise erstellt, jedoch gewinnen kontinuierliche Mischprozesse zunehmend an Bedeutung. Tabelle 1 [5] vergleicht kontinuierliche und diskontinuierliche Mischprozesse für Feststoffe. Bei gege-

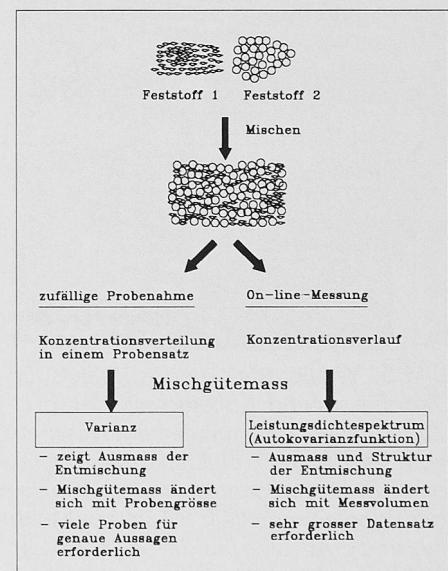


Bild 4. Qualität einer 2-Komponenten-Feststoffmischung

Einsatzdaten	Diskontinuierlich	Kontinuierlich
Anzahl Komponenten	beliebig	2-6, mehr Komponenten in einer Vormischung zusammenfassen
Häufigkeit des Rezeptwechsels	mehrmales pro Stunde	mehrere Stunden unverändertes Rezept
Häufigkeit der Reinigung oder Stillstand	mehrmales täglich	einmal pro Tag oder seltener
Produktionsleistung, Durchsatz	alle Leistungen	mehr als 100 kg/h, Ausnahme: Beschickung von Laborextrudern
Gefahr der Entmischung	vorhanden, deshalb kurze Transportwege, wenig Zwischen-speicher, Gestaltung des Mischerauslaufes	geringe Gefahr bei direkter Zuführung zur nächsten Prozeßstufe oder Abfüllung
Raumbedarf	größerer Raumbedarf bei Leistungen über 5000 kg/h,	geringer Raumbedarf selbst bei großen Durchsätzen
apparative Anforderungen	einfache Dosierung, hohe Anforderungen an den Mischer	Genaue kontinuierliche Dosierung (Dosierwaage notwendig), geringere Anforderungen an den Mischer.
Sicherheit	Maßnahmen für explosionsgefähr-dete Stoffe erforderlich	kleine Materialmengen im Prozeß besitzen geringes Gefahrenpotential, vereinfacht sicherheitstechnische Gestaltung
Automation	aufwendiger; beispielsweise diskontinuierliche Dosierung (Befüllen) mit Behälterwaage	im Prozeß integriert

Tabelle 1. Vergleich von diskontinuierlichen und kontinuierlichen Mischverfahren

benem Durchsatz ist die Mischzeit in einem kontinuierlichen Mischer durch die Verweilzeit des Materials im Mischer fest vorgegeben, zu dieser geringeren Flexibilität kommen An- und Abfahrverluste als weitere Nachteile des kontinuierlichen Prozesses. Doch besitzt er wesentliche verfahrenstechnische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem Chargenprozess.

Kontinuierliche Mischer sind selbst bei hoher Durchsatzleistung kompakt.

Dies bedeutet kurze Mischwege und damit insgesamt eine einfachere Vermischung. Integriert in eine kontinuierliche Produktion spart ein kontinuierlicher Mischerprozess Speicher und Silos ein. Damit wird die Gefahr einer Entmischung vermindert. Des weiteren kann er aufgrund seiner kompakten Bauweise leicht vor der nächsten, weiterverarbeitenden Stufe positioniert werden. Hierdurch ist gewährleistet, dass die nächste Stufe des Prozesses tatsächlich eine Mischung hoher Qualität zur Verfügung gestellt bekommt. Bei gefährlichen Produkten oder Ausgangsmaterialien besitzt der kontinuierliche Prozess ein niedrigeres Gefahrenpotential, da jeweils nur eine kleine Materialmenge im Mischer akkumuliert ist.

Auslegung kontinuierlicher Mischprozesse

Einem kontinuierlichen Mischer stellen sich prinzipiell zwei Aufgaben. Die Komponenten, die im Extremfall räumlich nebeneinander in den Mischer gelangen, müssen radial gemischt werden. Radial heißt in diesem Fall quer zur Transportrichtung des Gutes im Mischer. Ist die Dosierung nicht zeitkonstant oder sind die Komponenten in sich inhomogen, muss der Mischer zusätzlich auch Konzentrationsunterschiede in axialer Richtung, d. h. in Transportrichtung, ausgleichen. Dies ist in der Regel die schwierigere Mischaufgabe. Die Fähigkeit des Mischer zum Ausgleich von Konzentrationsschwankungen, die durch eine schlechte Dosierung in den Mischer gelangen, wird bestimmt durch die Verweilzeitverteilung des Produktes im Mischer. Die mittlere Verweilzeit wird durch Füllvolumen, d. h.

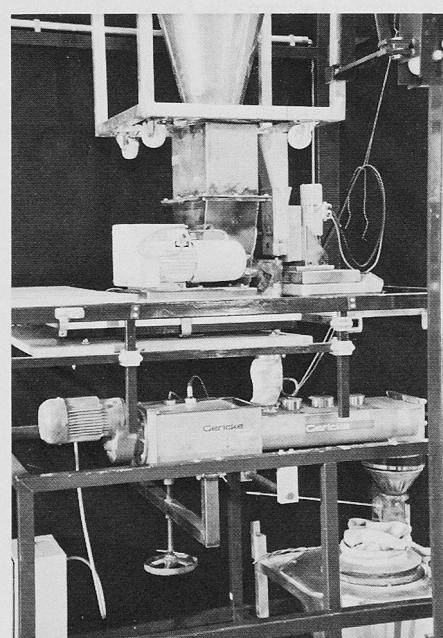


Bild 5. Versuchsanlage des Instituts für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich zum kontinuierlichen Mischen von Feststoffen: Einlasskonzentration der Tracerkomponente wird aus Waagensignalen ermittelt; Mischer: Multi-flux und GAC 307 (beide Gericke AG); Bestimmung von Konzentrationsverlauf und Mischgüte am Mischerauslass mit faseroptischer In-line-Messung

Füllgrad und Baugröße, bestimmt; die Breite der Verteilung durch die Anordnung der Mischwerkzeuge.

Die Qualität einer Mischung kann mit der Varianz oder dem Leistungsdichtespektrum beschrieben werden. Dies gilt natürlich auch für Produkte, die einen kontinuierlichen Mischer verlassen. Neben der Qualität einer kontinuierlich erstellten Mischung ist darüber hinaus von grossem Interesse, inwieweit ein kontinuierlicher Mischer stoffliche Inhomogenitäten der Feedkomponenten oder eine schwankende Dosierung durch axiale Vermischung abbauen kann. Danckwerts [6] schlug zur Beschreibung dieses Abbaus den Begriff «Varianzreduktion» (engl. variance reduction ratio; VRR) vor. Diese ist definiert als das Verhältnis der Varianzen am Ein- und Auslass des Mischers:

$$VRR = \frac{\sigma_{in}^2}{\sigma_{out}^2} \quad (1)$$

Die Varianzreduktion vergleicht also die Mischqualität am Ein- und Auslass des Mischers und charakterisiert damit die Effizienz eines kontinuierlichen Mischers zum Abbau von Dosierschwankungen. Dies soll an einem realen Beispiel illustriert werden. Bild 5 zeigt ein Foto der Anlage zur Untersuchung des kontinuierlichen Mischens am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich [4]. Zwei Dosierer führen dem Mischer die Komponenten zu. Beide Dosierer stehen samt Vorratsbehältern auf Waagen, aus der Abnahme des Gewichts über der Versuchsdauer werden Mengenströme und Konzentration der Tracerkomponente am Mischereingang bestimmt. Hauptkomponente ist weisses Al(OH)³, das mit einer dunklen Tracerkomponente, Siliciumcarbid oder Pigment Irgalite, vermischt werden soll. Untersucht wurden zwei horizontale Doppelwellenmischer unterschiedlicher Bauart, Multi-flux und GAC 307 (beide Gericke AG). Am Mischerausgang ist eine am Institut entwickelte faseroptische Messeinrichtung installiert, die mit hoher Zeitauflösung (5 Hz) eine In-line-Bestimmung der Konzentration an SiC und damit der Mischgüte erlaubt.

Um die Varianzreduktion im Mischer zu bestimmen, wurde bewusst die Dosierung verschlechtert, indem der Dosierer der Tracerkomponente periodisch an- und abgeschaltet wurde. Da die gewählte Tracerkonzentration sehr klein ist, ist der Füllgrad im Mischer nahezu konstant. Die Konzentration der Tracers SiC am Eingang des Multi-fluxmischers ist in Bild 6a gestrichelt eingezeichnet. Die Messwerte wurde aus den Waagensignalen berechnet. Die Tracerkonzentrationen am Mischerausgang,

Literatur

- [1] Uhl, V.W., Gray, J.B.: Mixing Vol. 1-3, Academic Press, Orlando, USA, 1986
- [2] Tatterson G., Calbrese R. (Hrsg.): Industrial Mixing Research Needs, AIChE, New York, 1989
- [3] Williams, J.C.: Mixing, Theory and Practice, Bd. 3; ed. V.W. Uhl, J. B. Gray, Academic Press, Orlando 1986
- [4] Weinekötter, R.: Kontinuierliches Mischen feiner Feststoffe, Dissertation Nr. 10083, ETH Zürich, 1993
- [5] Weinekötter, R., Gericke, H.: Mischen von Feststoffen, Springer-Verlag, in Vorbereitung
- [6] Danckwerts, P. V.: Continuous Flow Systems. Distribution of Residence Times, Chem. Eng. Sci. 1953, Nr. 2, S. 1

die mit der faseroptischen Sonde ermittelt wurden, sind in Bild 6a mit einer durchgezogenen Linie gekennzeichnet. Durch das periodische An- und Abschalten des Tracerdosierers schwankt die Konzentration am Einlass in Form einer Rechteckwiegung. Da Schwankungen (Streuung) um eine Mittellage hohe Varianz bedeuten, ist die Eingangsvarianz hoch. Der Mischer soll nun diese Eingangsschwankung dämpfen, wodurch die Varianz reduziert würde. In der obersten Versuchsreihe, in der der Tracerdosierer alle 60 Sekunden an- und abgestellt wurde, also mit einer Periode von 120 Sekunden, gelingt dies nicht. Die Schwankung am Mischerausgang ist genauso gross wie am Eingang. Da die mittlere Verweilzeit im Mischer nur 44 Sekunden beträgt und damit deutlich kleiner als die Periode der Dosierschwankung ist, erstaunt dies nicht. In den beiden folgenden Versuchen wurde der Dosiertakt verkürzt. Nun beträgt die Periode T_p 40 bzw. 30 Sekunden, die mittlere Verweilzeit im Mischer ist wiederum 44 Sekunden. Hier gelingt es dem Mischer nun, diese Eingangsschwankungen deutlich zu reduzieren. Die Varianzreduktion, die Fähigkeit des Mixers, Eingangsschwankungen zu dämpfen, wird also wesentlich vom Verhältnis der Periode der Dosierschwankung zur mittleren Verweilzeit im Mischer bestimmt. Eine genauere Analyse ist mit einer Frequenzanalyse im Leistungsdichtespektrum möglich (Bild 6b).

Die Varianzreduktion, die in einem Mischer erreicht werden kann, wird neben der mittleren Verweilzeit insbesondere von der Verweilzeitverteilung des Materials im Mischer bestimmt. Je breiter die Verweilzeitverteilung, um so höher ist die axiale Vermischung und damit eine Dämpfung der Eingangsschwankung. Verweilzeitverteilungen bei verschiedenen Betriebszuständen wurden experimentell durch Sprungversuche

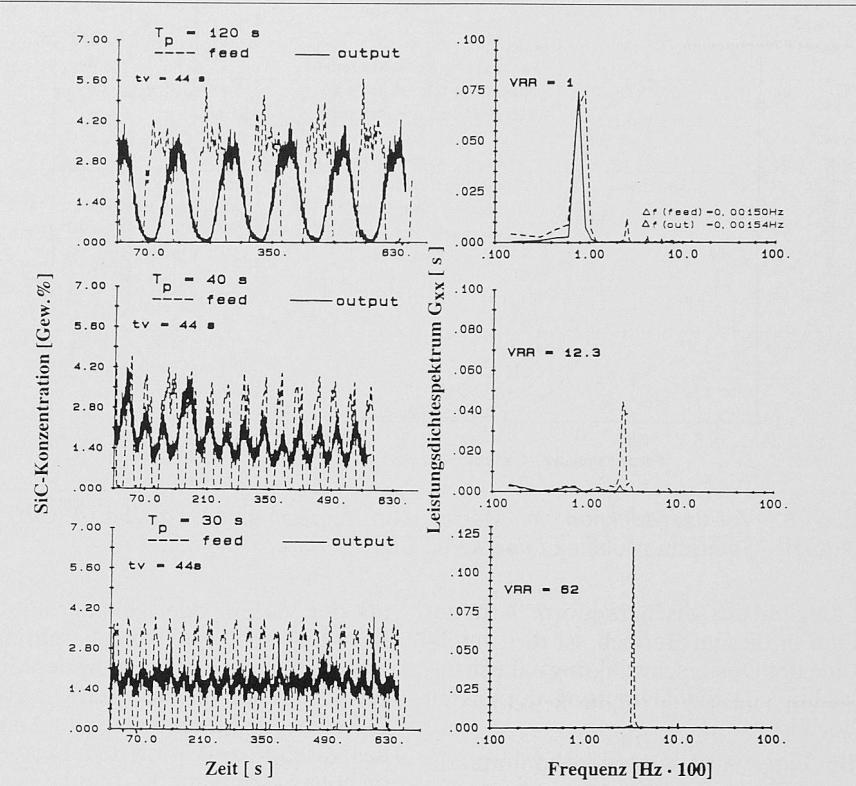


Bild 6. Varianzreduktion im kontinuierlichen Multifluxmischer II (Gericke). Tracerdosierer (SiC) getaktet, Parameter: Periode des Taktes T_p , Dosierstrom der Hauptkomponente Al(OH)_3 ist konstant, a) Konzentrationsverlauf b) Leistungsdichtespektrum. Gemisch SiC (Tracer, $d_{p3,50} = 26 \mu\text{m}$) und Al(OH)_3 ($d_{p3,50} = 26 \mu\text{m}$)

ermittelt. Bild 7 zeigt die Verweilzeitverteilung im GAC-307-Mischer bei einem Feststoffdurchsatz von 74 kg/h. Die experimentell bestimmte Verteilung wurde mit dem Dispersionsmodell verglichen, der Mischer konnte dabei durch eine Bodensteinzahl von 10 charakterisiert werden. Eine Bodensteinzahl nahe Null bedeutet maximale Rückvermischung (idealer Rührkesel). Bei sehr hohen Bodensteinzahlen verschwindet die axiale Vermischung, eine Varianzreduktion ist nicht mehr möglich.

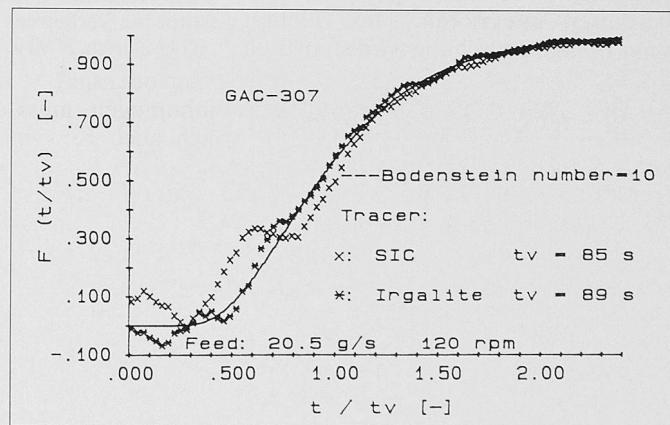
Auslegungsdiagramm für kontinuierliche Feststoffmischprozesse

Das Dispersionsmodell, ein für Feststoffgemische geändertes Modell von

Danckwerts und Experimente führen zu den Auslegungsdiagrammen in Bild 8 [4]. Die Zielgröße Varianzreduktion ist die y-Achse. Aufgetragen ist die Varianzreduktion VRR über der Periode der Dosierschwankung, die zudem mit der mittleren Verweilzeit t_v nominiert wurde. Parameter ist die Bodensteinzahl, welche die Axialvermischung (Rückvermischung) im kontinuierlichen Mischer beschreibt. Ebenfalls eingezeichnet sind experimentelle Werte, die aus Versuchen analog Bild 6 erhalten wurden.

Mit länger werdender Periode der Dosierschwankung nimmt die Fähigkeit des Mixers stark ab, die Eingangsvarianz zu reduzieren. Ist die Periode der Dosierschwankung jedoch deutlich kürzer als die mittlere Verweilzeit, steigt die

Bild 7. Summenverteilung $F(t)$ der Verweilzeit im GAC-307-Mischer (Gericke AG). Gemisch: Al(OH)_3 ($d_{p3,50} = 70 \mu\text{m}$) mit SiC ($d_{p3,50} = 26 \mu\text{m}$) oder Irgalite ($d_{p3,50} = 0,22 \mu\text{m}$), mittlere Verweilzeit t_v 85 bzw. 89 Sekunden



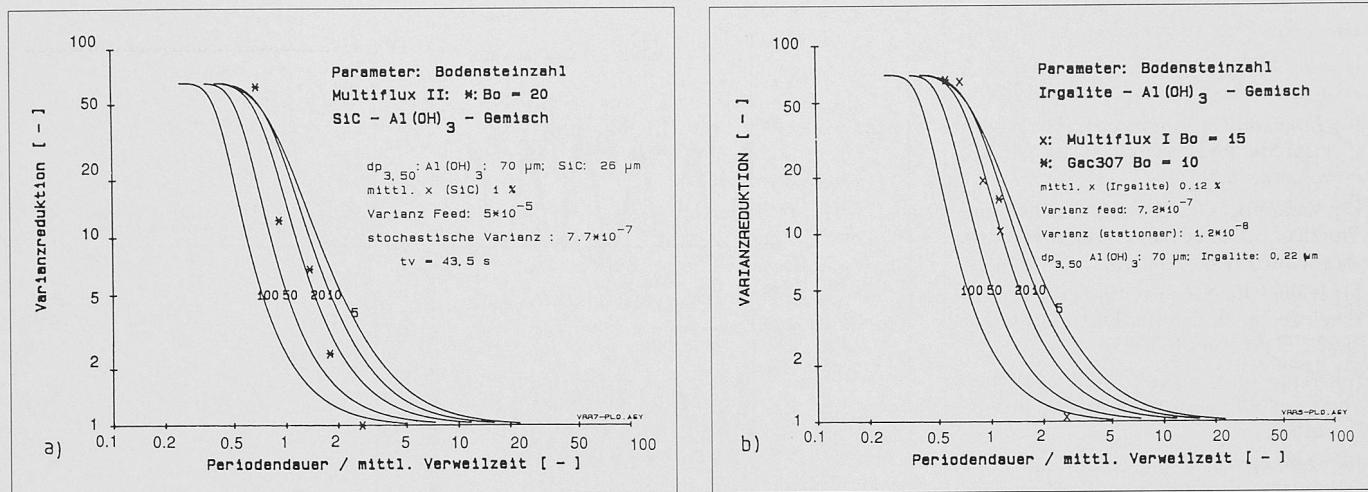


Bild 8. Varianzreduktion in Modell und Experimenten. a) SiC-Al(OH)₃-Gemisch; Multiflux II Mischer, b) Irgelite-Al(OH)₃-Gemisch, Multiflux I und GAC 307

Fähigkeit des Mischers enorm. Arbeitet man in diesem Bereich, ist die Amplitude der Dosierschwankung nahezu unwichtig, da die Dämpfung dermassen hoch ist.

Bei einer Auslegung von kontinuierlichen Feststoffmischprozessen ist eine hohe Varianzreduktion anzustreben. Dies lässt sich bei gegebener Bodensteinzahl auf zwei Wegen erreichen:

- Tieffrequente Dosierschwankungen mit grosser Periode T_p werden in grossvolumigen Mischern mit hohen Verweilzeiten abgebaut.
- Ein auf den Mischprozess optimiertes Dosiersystem lässt nur hochfrequente Dosierschwankungen in den Mischer gelangen, dies ermöglicht die Verwendung kompakter Mischer.

Letzterer Weg ist verfahrenstechnisch vorzuziehen.

Zusammenfassung

Kontinuierliche Mischer reduzieren die Entmischungsgefahr, da Transportwege und Zwischenspeicherung eingespart werden. Eine sicherheitstechnische Gestaltung gegenüber einem Chargenmischprozess ist vereinfacht, eine kontinuierliche Mischgütemessung zur automatischen Dosierung lässt sich ins Verfahren integrieren. Die Qualität einer Feststoffmischung wird statistisch

mit der Varianz oder genauer mit dem Leistungsdichtespektrum beschrieben. Durch In-line-Überwachung des Mischprozesses kann die erforderliche grosse Datenmenge für eine vertiefte Analyse des Mischprozesses mit dem Leistungsdichtespektrum zur Verfügung gestellt werden. Ein faseroptisches In-line-Verfahren, das den Anteil farblich sich unterscheidender Feststoffkomponenten in der Mischung mit hoher Zeitauflösung erkennt, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelt. Verfahren und Auswertung lässt sich auf andere Methoden zur Mischgütebestimmung, beispielsweise In-line-Spektralanalyse, anwenden. Mit diesem Verfahren konnte die Effizienz kontinuierlicher Mischer zum Abbau von Dosierschwankungen, die Varianzreduktion, experimentell bestimmt und ein Modell zur Auslegung kontinuierlicher Mischprozesse überprüft werden. Die Güte der Dosierung bestimmt wesentlich die erforderliche Verweilzeitverteilung im Mischer und damit Baugrösse des Mischers und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Adressen der Verfasser: R. Weinekötter, Dr. sc. techn., Gericke AG, Althardstrasse 120, 8105 Regensdorf, L. Reh, Prof. Dr.-Ing., Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH Zürich, 8092 Zürich

Leicht überarbeiteter Vortrag, gehalten am 19.10.1993 an der Tagung der SIA-Fachgruppe für Verfahrens- und Chemieingenieur-Technik (FVC) anlässlich der Ilmac 93 in Basel. Bereits in dieser Reihe abgedruckte Referate:

- «Die unternehmerische Aufgabe des Ingenieurs und des technischen Naturwissenschaftlers», W. Regenass, SI+A 19, 5.5.1994, S. 325
- «Der Beitrag des Ingenieurs bei Entwicklung und Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen», K. Hümbelin, SI+A 24, 9.6.1994, S. 455
- «Anlagensicherung mit Mitteln der MSR-Technik», P. Brusa, SI+A 29, 14.7.1994, S. 556
- «Anlagenbau und Technologietransfer biotechnischer Anlagen in Tschechien H.-P. Meyer, SI+A 35, 25.8.1994, S. 656
- «Membraneinsatz bei chemischen Produktionsverfahren», R. Waldburger, SI+A 42, 13.10.1994, S. 839

Mit dem vorliegenden Beitrag ist die Reihe abgeschlossen.

Verdankung

Das Projekt «Kontinuierliches Mischen feiner Feststoffe» wurde unterstützt durch die Gericke AG, Regensdorf/Zürich, die Lonza AG, Basel, und die Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (KWF), Bern.