

Gas/Feststoff-Rieselströmung in einer Füllkörperkolonne*

A. W. M. Roes und W. P. M. van Swaaij**

Die Rieselströmung eines Feststoffes im Gegenstrom zu einem Gas ist ein neues kontinuierliches Gas/Feststoff-Kontaktverfahren mit verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten in der chemischen Industrie. So lassen sich z. B. Gasgemische, auch bei relativ hohen Temperaturen auf chemischem oder physikalischem Weg trennen (z. B. Rauchgas-Reinigung, Rückgewinnung von Lösungsmitteln). Da die Oberflächen-Eigenschaften von Feststoffen ziemlich einfach mit Metalloxiden oder hochzähigen Flüssigkeiten (ähnlich wie bei der Gas-Chromatographie) modifizierbar sind, liegt ein weites Spektrum verschiedenartiger praktischer Anwendungen vor. Auch sollte es möglich sein, eine Gas/Feststoff-Füllkörperkolonne als chemischen Reaktor zu betreiben, vor allem bei Gleichgewichtsreaktionen, wobei hohe Umsätze erreichbar sind, wenn eines der Reaktionsprodukte, auf der Feststoffoberfläche adsorbiert, der Reaktionszone entzogen wird.

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, das hydrodynamische Verhalten einer Gas/Feststoff-Füllkörperkolonne zu untersuchen und den Einfluß der Axialvermischung beider Phasen und den Einfluß der Stoffübertragung zwischen den beiden Phasen auf den Wirkungsgrad der Kolonne zu bestimmen.

Für diese Untersuchungen wurde eine Kolonne (Durchmesser 0,075 m, Höhe 1,00 m) verwendet, die mit Pall-Ringen (0,015 m), Raschig-Ringen (0,010 m) oder Drahtnetz-Ringen (0,010 m) gefüllt war. Als Feststoff wurde ein Siliciumdioxid/Aluminiumoxid-Katalysatorträger (mittlerer Partikel-Durchmesser $60 \cdot 10^{-6}$ m) und als Gasphase Luft verwendet. Untersucht wurden 1) der Druckverlust in der Gasphase, 2) der Feststoffinhalt der Kolonne, 3) die Flutgrenze der Füllkörperschüttungen, 4) die Verweilzeitverteilung der Gasphase mit Helium als Spurgas, 5) die Verweilzeitverteilung des Feststoffes mit schwarzgefärbten Feststoffteilchen als Indikator und 6) die Trennwirkung der Kolonne bei Anwendung von Luft/Freon-12 (2-Vol.-%) als Gasphase.

Genauso wie bei Gas/Flüssigkeits-Rieselströmung ergaben Messungen einen sehr niedrigen Druckverlust, der bei höheren Gas- und Feststoff-Geschwindigkeiten zunahm. Es wurde eine Korrelation gefunden, mit deren Hilfe es möglich ist, die Fraktion des in der Gasphase suspendierten Feststoffs zu ermitteln. In dem für die Praxis interessanten Gebiet sind weniger als 60 % des Feststoffs in der Gasphase suspendiert. (Im mehrstufigen Wirbelschicht-Verfahren dagegen soll der Feststoff vollständig suspendiert werden.)

Der Feststoffinhalt der Kolonne zerfällt wie bei Gas/Flüssigkeits-Systemen in einen dynamischen Teil, der von den Füllkörpern abrieselt, wenn die Feststoffzufuhr unterbrochen wird, und einen statischen Teil, der auf den Füllkörpern zurückbleibt. Der statische Feststoffinhalt ist näherungsweise von der Gas- und der Feststoff-Belastung unabhängig, hängt aber von der Art des Feststoffes und der Füllkörper ab. Unterhalb des unteren Staupunkts ist der dynamische Feststoffinhalt von der Gasbelastung unabhängig und wächst im Verhältnis zu der ansteigenden Mengenströmungsdichte des Feststoffes. Dies wird auch bei nichtnetzenden Gas/Flüssigkeits-Systemen (z. B. bei Verwendung von Quecksilber) gefunden und deutet auf

eine konstante Geschwindigkeit der Feststoff-Partikeln hin.

Ähnlich wie bei Gas/Flüssigkeits-Systemen gibt es bei Gegenstrom von Gas und Feststoff zu jeder Feststoffbelastung eine bestimmte Gasbelastung, von der an der Feststoff nicht mehr abfließt, sondern vom Gas nach oben gerissen wird: der obere Staupunkt oder Flutpunkt. Diese Flutgrenze wird schneller erreicht, wenn die Feststoffbelastung zunimmt.

Zur Beschreibung der maßgebenden Transportvorgänge in der Füllkörperkolonne unter Adsorptionsbedingungen wurde ein mathematisches Modell verwendet, dem Pfropfenströmung mit Axialvermischung der beiden Phasen zugrunde liegt. Zwischen den beiden Phasen findet darüber hinaus Stoffübertragung statt. Die Modellparameter sind die Bodenstein-Zahlen der beiden Phasen (Bo_g und Bo_s) und die Höhe einer realen Stoffübertragungsstufe H_k , definiert nach Colburn.

Die Bodenstein-Zahl der Gasphase ist sehr stark von der Feststoffbelastung abhängig; ist die Feststoffgeschwindigkeit null, so ist Bo_g wie erwartet ungefähr 2. Im Fall einer sehr geringen Feststoffströmung nimmt, vor allem bei niedrigen Gasbelastungen, die Axialvermischung der Gasphase stark zu. Bei höheren Gasgeschwindigkeiten, die für praktische Anwendungen wichtig sind, liegt Bo_g zwischen 0,8 und 1,2, so daß die Gasphase unter diesen Bedingungen als Pfropfenströmung aufgefaßt werden darf.

Die Bodenstein-Zahl der Feststoffphase ist näherungsweise von der Gasbelastung unabhängig und steigt mit zunehmender Feststoffgeschwindigkeit an. Im Gebiet von praktischem Interesse liegt Bo_s zwischen 0,15 und 0,20; es findet also eine stärkere Axialvermischung statt als in der Gasphase.

Die Höhe einer realen Stoffübertragungsstufe H_k läßt sich nach Stemerding und Zuiderweg ermitteln aus der Höhe einer scheinbaren Stoffübertragungsstufe $H_{k,ov}$, die durch Adsorptionsexperimente bestimmt worden ist. H_k ist innerhalb der Genauigkeit der Versuche von der Mengenströmungsdichte des Feststoffes unabhängig. Bei niedrigen Gasbelastungen ist H_k sehr klein (näherungsweise null) und nicht genau erfassbar. Mit zunehmender Gasgeschwindigkeit steigt H_k an, ist aber im untersuchten Gebiet immer kleiner als 0,15 m. Bei niedrigen Gas- und Feststoffbelastungen wird der Wirkungsgrad einer Gas/Feststoff-Füllkörperkolonne daher vollständig von der Axialvermischung der beiden Phasen bestimmt. Nimmt dagegen die Gas- und Feststoffbelastung zu, dann spielen auch Stoffübertragungsbeschränkungen eine Rolle. Die Höhe einer scheinbaren Stoffübertragungsstufe, die ein direkter Maßstab für die Trennleistung der Kolonne ist, beträgt im untersuchten Gebiet jedoch immer weniger als 0,20 m.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Gas/Feststoff-Rieselströmung durch eine Füllkörperkolonne ein flexibles kontinuierliches Gas/Feststoff-Kontaktverfahren ist, das dem idealen Gegenstrombetrieb nahekommt wegen des niedrigen Druckverlustes und geringer Axialvermischung in den Phasen und guter Stoffübertragung zwischen den Phasen. Deswegen scheint es sinnvoll zu sein, Untersuchungen über praktische Anwendungen und zur Maßstabsvergrößerung durchzuführen.

Einer der Autoren (A. W. M. Roes) möchte DSM für das ihm verliehene Stipendium danken.

Eingegangen am 4. September 1978

Schlüsselworte: Füllkörperkolonne, Mehrphasenströmung, Gas/Feststoff-Strömung, Axialvermischung, Stoffübergang.

* Vortrag von A. W. M. Roes auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 27. bis 29. September 1978 in Aachen.

** Dr. Ir. A. W. M. Roes (neue Anschrift: KSLA Badhuisweg 3, Amsterdam-N) und Prof. Dr. Ir. W. P. M. van Swaaij, Technische Hogeschool Twente, afd. Chemische Technologie, Postbus 217, Enschede, Nederland.

Das vollständige Manuskript dieser Arbeit (in englischer Sprache) umfaßt 44 Seiten mit 19 Abbildungen, 3 Tabellen und 22 Literaturzitierten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 694/79 erhältlich. Eine Bestellkarte finden Sie am Schluß dieses Heftes.