Stoffübergang in Drehzylinderapparaten

Dr.-Ing. Alfred Schymalla

1. Strömung in Drehzylinderapparaten

Wer die Strömung in Drehzylinderapparaten das erste mal beobachtet, ist fasziniert. In dem Spalt zwischen dem drehbaren inneren Zylinder und der äußeren zylindrischen Wand kann man ein gleichmäßiges Wirbelmuster sehen, das über einen relativ weiten Drehzahlbereich stabil zu sein scheint. Dieses Wirbelmuster läßt sich verhältnismäßig leicht sichtbar machen und ist seit etwa 100 Jahren immer wieder Gegenstand zahlreicher Experimente und theoretischer Untersuchungen gewesen. Taylor hat als erster versucht, das Zustandekommen der nach ihm benannten Wirbel zu deuten (1). Weitere Autoren haben, aufbauend auf den Untersuchungen von Taylor, versucht, im Drehzylindersystem das Geheimnis der Turbulenz zu lüften.

In den letzten 10 Jahren hat die Verfahrenstechnik sich mit diesem interessanten Apparat immer wieder beschäftigt.

Das typische Wirbelmuster – die Taylorwirbel – zeigen sich dem Betrachter als Fischgrätenmuster (Bild 1), das durch die Überlagerung der Wirbelbewegung mit der Rotationsströmung ergibt. Die Wirbel sind ringförmig und paarweise gegenläufig angeordnet.

Bild 1: Wirbelströme im Drehzylinderapparat

Die Höhe der Wirbel entspricht nach Taylor der Spaltweite zwischen dem inneren und dem äußeren Zylinder. Untersuchungen des Autors ergaben, daß besonders bei zähen Flüssigkeiten die Wirbelhöhe das doppelte der Spaltweite überschreiten kann und das Wirbel verschiedener Höhe nebeneinander existieren können.

Unter Verwendung der Spaltweite und der Drehzahl des inneren Zylinders läßt sich eine Reynoldszahl definieren, die meistens Taylorzahl genannt wird. Der Versuch, den Einfluß des Durchmessers des Innenzylinders bzw. des Durchmesserverhältnisses zu berücksichtigen, hat zur Definition von mindestens 9 verschiedenen Taylorzahlen geführt. Eine Taylorzahl, die alle Erscheinungen der Wirbelströmung ausreichend gut erfaßt, ist bisher noch nicht gefunden worden.

In Drehzylinderapparaten lassen sich wie bei der Rohrströmung die verschiedenen Strömungsarten – laminare, Wirbelströmung und Turbulenz – in Abhängigkeit von der Drehzahl erzeugen und bestimmen, charakter-

istischen Bereichen der Taylorzahlen zuordnen. Die laminare Strömung läßt sich nur sehr schwer beobachten und hat bisher sehr wenig Beachtung gefunden. Das größte Interesse haben die Taylorwirbeln gefunden, die sich im Übergangsbereich zwischen der laminaren und der turbulenten Strömung ausbilden. Sie sind leicht zu beobachten und gut reproduzierbar zu erzeugen. Die Strömung innerhalb der Taylorwirbeln ist laminar. Bei Steigerung der Drehzahl werden sie instabil. Diese Instabilität zeigt sich in einer Welligkeit der Wirbelgrenzen, die die Existenz einer zusätzlichen Wirbelbewegung innerhalb des Taylorwirbels anzeigt (Bild 2). Bei einer weiteren Steigerung der Drehzahl werden die Wirbelgrenzen immer unschärfer; der Übergang zur Turbulenz vollzieht sich für den Beobachter langsam.

Bild 2: Wirbelströmung beim Übergang zur Turbulenz

2. Dispersionsverhalten

Die Geschwindigkeitsverteilung im Spalt eines Drehzylinderapparates zeigt Bild 3. Abgesehen von den gro-

Bild 3: Geschwindigkeitsverteilung im Zylinderspalt

Bild 4: Blasenverteilung bei geringem Gasdurchsatz

Bild 5: Blasenverteilung bei hohem Gasdurchsatz

ßen Geschwindigkeitsgradienten in den Grenzschichten des inneren und des äußeren Zylinders ist der Geschwindigkeitsgradient im Spalt relativ gering. Das müßte gute Voraussetzungen für die Dispergierung von Flüssigkeiten und Gasen schaffen.

Miteinander nicht mischbare Flüssigkeiten lassen sich im Drehzylinderapparat sehr einfach dispergieren. Die erreichbare Tropfengröße ist von der Apparategeometrie und der Drehzahl abhängig. Aus diesem Grunde wurde der Apparat zur Flüssig-Flüssigextraktion patentiert.

(2). Die Dispersion von Gasen ist schwieriger. Gase sind kompressibel und deshalb elastisch. Die Gasblasen bewegen sich infolge der Zentrifugalwirkung am rotierenden, inneren Zylinder. Eine merkliche Zerkleinerung der Blasen aber unterbleibt, obwohl der Geschwindigkeits-

Bild 6: hld up als Funktion der Drehzahl

gradient am rotierenden Zylinder am größten ist. Die Blasen werden infolge der Flüssigkeitsströmung in Bewegungsrichtung verformt (Bild 4, 5). Auffällig ist, daß die Blasen sich an den Grenzen der Taylorwirbel sammeln und dabei koaleszieren. Diese Koaleszenz neigung nimmt besonders bei höheren Gasgehalten mit steigender Drehzahl zu, wie Messungen des dispergierten Gasanteils (hold up) andeuten (Bild 6).

3. Untersuchungen zum Stoffübergang

Für die Messung des volumetrischen Stoffübergangskoeffizienten (kl a-Wert) wurde ein Laborapparat (Durchmesser 80 mm, Höhe 500 mm, Innenzylinder variabel) verwendet. In diesem Apparat wurde sauerstoffarmes Wasser im kontinuierlichen Betrieb im Gegenstrom mit Luft begast. Aus der Zunahme des Sauerstoffgehaltes und dem Wasserdurchsatz wurde der kl a-Wert errechnet. Die Darstellung der Abhängigkeit des kl a-Wertes vom spezifischen Energieeintrag (Bild 7) im logarithmischen Maßstab ergibt Kurven, die im Bereich der laminaren Wirbel bis $P/V = 20 \text{ W/m}^3$ einen Anstieg von etwa 0,2–0,25 aufweisen. Der Übergang zur Turbulenz ist bei $P/V = 40 \text{ W/m}^3$ abgeschlossen und der Anstieg der Kurve beträgt 0,4 – 0,5, wie es für Rührer häufig beobachtet wird.

Bild 7: Stoffübergang im System Wasser-Luft

Auch Messungen des Stoffübergangs in Abhängigkeit von der Gasleerrohrgeschwindigkeit ergeben für Rührreaktoren typischen Werte. Für Drehzylinderreaktoren ergibt sich noch ein zusätzlicher Einfluß durch die Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit.

Für das Stoffsystem Wasser / Luft wurde als empirische Abhängigkeit ermittelt :

$$kl a = 0,05 \cdot (P/V)^x \cdot U_{GO}^y \cdot U_{WO}^z$$

$$x = 0,2 - 0,25 \text{ laminare Wirbel}$$

$$x = 0,55 \text{ turbulente Strömung mit Wirbelstruktur (enger Zylinderspalt)}$$

$$x = 0,4 - 0,5 \text{ turbulente Strömung ohne Wirbelstruktur (weiter Zylinderspalt)}$$

$$y = 0,4 - 0,6 \text{ in Abhängigkeit von der Koaleszenz}$$

$$z = 0,5$$

4. Anwendung von Drehzylinderapparaten

Das interessante Wirbelmuster in Drehzylinderapparaten hat zu einer Reihe von Versuchen und technischen Anwendungen geführt :

- Flüssig-Flüssigextraktion
- Destillation
- dynamische Mikrofiltration
- Flockulation
- Bioreaktor
- Synthesen in Mehrphasensystemen
- Gaswascher

Für den Reaktionstechniker sind besonders die Taylorwirbel von Interesse; jeder Taylorwirbel kann als eine Rührkesselstufe aufgefaßt werden. Krause (3) hat das Verweilzeitverhalten von Drehzylinderapparaten im Ein- und Zweiphasenbetrieb (Gas- und Flüssigphase) untersucht :

- Im Einphasenbetrieb entspricht die gemessene Rührstufenzahl etwa der Anzahl der Taylorwirbel, solange diese eine laminare Struktur haben. Die Verweilzeitverteilung bleibt auch noch günstig, wenn die Laminarität der Wirbel verlorengeht.
- Im Gas-Flüssigbetrieb ist die Verweilzeitverteilung nur in einem engen Drehzahlbereich günstig. Der Zerfall der Taylorwirbel wird zu höheren Drehzahlen verschoben. Im Bereich der turbulenten Strömung werden nur wenige Rührstufen pro Meter Reaktorhöhe erreicht.

In Drehzylinderapparaten von technisch relevanter Größe werden die kritischen Reynoldszahlen (Taylorzahlen) für den Zerfall der Taylorwirbel und für die Ausbildung der Turbulenz schon bei geringen Drehzahlen überschritten. Die günstige Verweilzeitverteilung der Wirbelströmung läßt sich damit nur in Apparaten im kleintechnischen Maßstab nutzen.

Aus diesem Grunde wird der Drehzylinderapparat wahrscheinlich immer nur ein interessanter Laborreaktor mit Optionen auf die kleintonnagige Produktion bleiben.

Literatur

- (1) Taylor G. I., Phil.Trans. R. Soc. 1923 A 223,289-343
- (2) Maycock, US-Patent 1945
- (3) Krause, B.; Dissertation 1988

Verfasser

Dr.-Ing. Alfred Schymalla
Wasser- und Entsorgungstechnik
im TGZ Wildau
Bahnhofstr. 1
Tel.: (03375) 508 385