

Johannes Briesovsky

Technologische Prozessintensivierung durch resonante Pulsationen

1 Einführung

Die Resonanzpulsationstechnik (RPT) ist ein radikal innovatives Prinzip für die Verbesserung verfahrenstechnischer Prozesse und Apparate im Sinne der Prozess-Intensivierung (PI) (vgl. Stankiewicz/Moulijn 2004). Das Fluid bzw. der fluidisierbare Stoff (z.B. Pulver) werden als Fluidsäule zu Eigenschwingungen (Resonanz) im Infraschallfrequenzbereich erregt. Die Infraschallwellen (Eigenschwingungsfrequenz unter 20 Hz) breiten sich mit Schallgeschwindigkeit als Druckänderung aus, wobei diese im Gegensatz zu Ultraschallwellen kaum gebremst werden. Dieser und andere Effekte, z.B. der Annuläreffekt (vgl. Richardson/Tyler 1929; Sexl 1930), bewirken radikale Prozessverbesserungen. Die RPT wurde für Flüssigkeiten (vgl. Baird 1964) und für Pulver (vgl. Ostrovsky 2000) entwickelt.

Da die Pulsation ohne mechanisch angetriebene Ein- und Anbauten (wie Rührer, Vibratoren, Rüttler oder Schüttler) erreicht wird, erfolgt eine medienchonende und energiesparende Fahrweise. Einsatzbereiche sind vorzugsweise Flüssigphasenprozesse mit Grenzflächen und Wänden sowie die Pulverbehandlung.

Bei dieser Technik wird das Fluid, vorzugsweise eine Flüssigkeit, in ein schwingfähiges System (Modell: U-Rohr-Schwingung, auch Wasserpengel genannt) durch Erregung zur Eigenschwingung (Resonanz) als Feder(Gaspolster)-Masse(Fluid)-Feder(Gaspolster)-System angeregt. Der Apparateboden wird nicht bewegt, was dieses Prinzip von anderen (vgl. etwa Krishna/Ellenberger 2002; Waghmare 2008) prinzipiell unterscheidet.

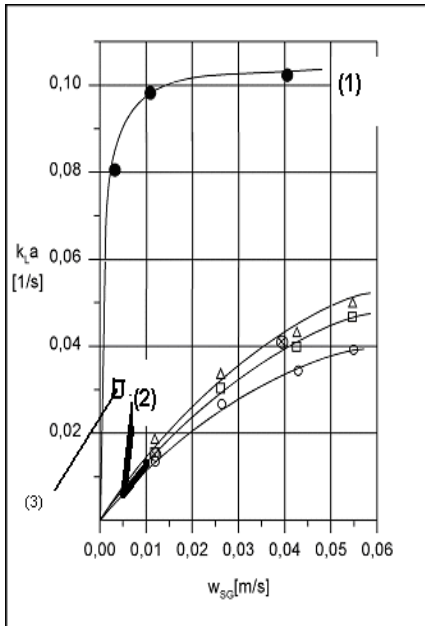
Nachfolgend werden die Prozesse der Flüssigkeitsbelüftung, der Bleicherde-Trocknung und der Flüssig-Flüssig-Extraktion an Beispielen beschrieben.

2 Flüssigkeitsbelüftung

Bei der Pulsationsbelüftung von Reinwasser wurden im Vergleich zur konventionellen Blasensäulenbelüftung wesentliche Steigerungen des Luftsauer-

stoffeintrages erreicht, was auf der Verkleinerung und der Vergleichmäßigung der Blasengrößen und somit der Erhöhung des Gasgehaltes sowie der Grenzschichtenrenewerung beruht. Die Abhängigkeit des volumenbezogenen Sauerstoffübergangs ($k_L a$ -Wert) bei der Luftbegasung von Reinwasser von der Leerrohrgasgeschwindigkeit mit Resonanzpulsation zeigt in Abbildung 1 eine Steigerung von bis zu Eintausend Prozent in dem biotechnologisch interessanten Gasgeschwindigkeitsbereich bis 0,01 m/s bei einer Erregerfrequenz von 28 Hz (Kurve (1) nach Ostrovsky 1990). Diese Steigerungen konnten in einer Versuchsanordnung mit Schwingungen des Apparatebodens (Kurve (2) nach Ellenberger/Krishna 2003) bei einer Frequenz von 60 Hz und einer Amplitude von 0,5 mm, und Versuchspunkt (3) nach Waghmare 2008) bestätigt werden. Blasensäulen ohne Pulsation ergaben wesentlich geringere Werte (untere Kurven nach Ellenberger/Krishna 2002; Ostrovsky 1990; Yu 1994).

Abbildung 1: Abhängigkeit des volumenbezogenen Sauerstoffübergangs bei der Luftbegasung von Reinwasser von der Leerrohrgasgeschwindigkeit ohne (untere Kurven) und mit Schwingungen



Eigene Darstellung

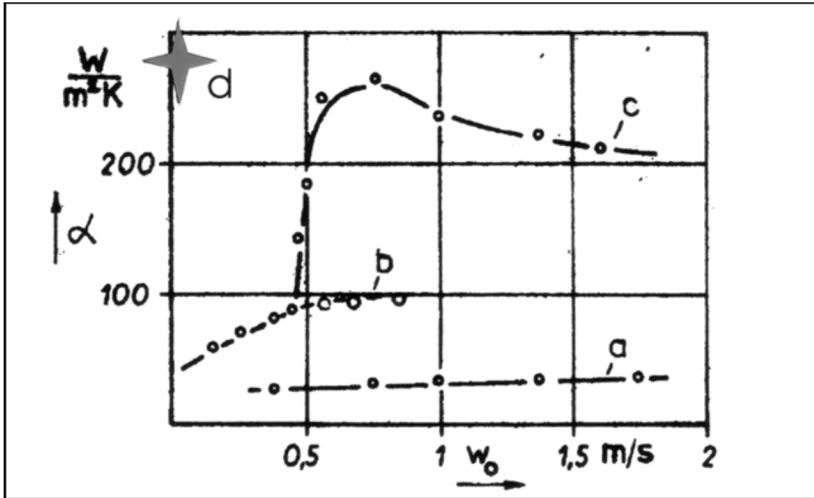
3 Pulvertrocknung

Es wurde die Bleicherde-Trocknung (mittlerer Korndurchmesser $140\ \mu\text{m}$) in einer elektrisch beheizten Kolonne (Durchmesser $150\ \text{mm}$) durchgeführt. In einer klassischen Wirbelschicht kann das Gut nur unter ganz besonderen Bedingungen getrocknet werden. In Resonanzpulsation entsteht bei einem sehr geringen Fluidisierungs-Luftstrom und einer aufgeprägten Pulsation eine sehr kompakte Wirbelschicht mit einer sehr intensiven Gutbewegung.

Obwohl bei der Resonanzpulsation des Gutes auch immer Gutfontänen auftreten, die das Gut ein Stück in den Gasraum wirbeln, ist die Mitreißrate von Gut durch den Gasstrom sehr gering. Der Grund ist die äußerst niedrige Gasgeschwindigkeit über der pulsierenden Schicht. Dadurch wird die Handhabung des feinkörnigen Produktes in einer Wirbelschicht überhaupt erst möglich. Durch die drastische Verringerung der Wirbelluft wird eine beachtliche Energiemenge für die Luftförderung auch unter Berücksichtigung des zusätzlichen Energieaufwandes für die Erzeugung der Pulsationen eingespart. Die Effektivität dieses Prozesses wird durch die erzielbare Intensitätsgröße für den Wärmeübergang von den Heizflächen an das Gut beschrieben. Diese Größe ist der Wärmeübergangskoeffizient: Je größer dieser Wert ist, umso besser ist der Wärmetransport von den Heizflächen an das Schüttgut. Ein guter Wärmetransport zum Gut ist die Voraussetzung für eine schnelle Trocknung.

Abbildung 2 zeigt eine aus der Fachliteratur (vgl. Heschel/Klose 1971) entnommene Darstellung der Abhängigkeit eines Wärmeübergangskoeffizienten (von Heizflächen an das Wirbelgut) und der Gasgeschwindigkeit in der Wirbelkammer in einem klassischen Wirbelschichtapparat. Die Abbildung zeigt, dass das Gut ab einer Gasgeschwindigkeit von $w_0 \approx 0,4\ \text{m/s}$ in den Wirbelzustand übergeht (Kurve c), der mit einer schnellen und deutlichen Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten verbunden ist. Etwa bei einer Gasgeschwindigkeit von $w_0 = 0,7\ \text{m/s}$ bis $0,8\ \text{m/s}$ wird der beste Wert des Wärmetransportes von der Heizfläche an das Wirbelgut mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von etwa $260\ \text{W}/(\text{m}^2\ \text{K})$ erzielt. Bei weiterer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit sinkt der Wert wieder. Der Stern charakterisiert das Ergebnis der eigenen Messungen für die Wärmeübergangszahl bei einer in Resonanz schwingenden Pulsationschicht. Die Fluidisierungs-luft strömte dabei mit einer Geschwindigkeit von $w_0 < 0,01\ \text{m/s}$ durch die Apparatur. Aus den Messergebnissen verschiedener Versuchsserien wurde ein Mittelwert des Wärmeübergangskoeffizienten von den Heizstäben an das Gut von $270\ \text{W}/(\text{m}^2\ \text{K})$ ermittelt.

Abbildung 2: Wärmeübergangskoeffizient α bei der Bleicherde-Trocknung in Abhängigkeit von der Leerrohrgasgeschwindigkeit im Pulsationstrockner (d) im Vergleich zur konventionellen Wirbelschicht (c) und einem Festbett (b)



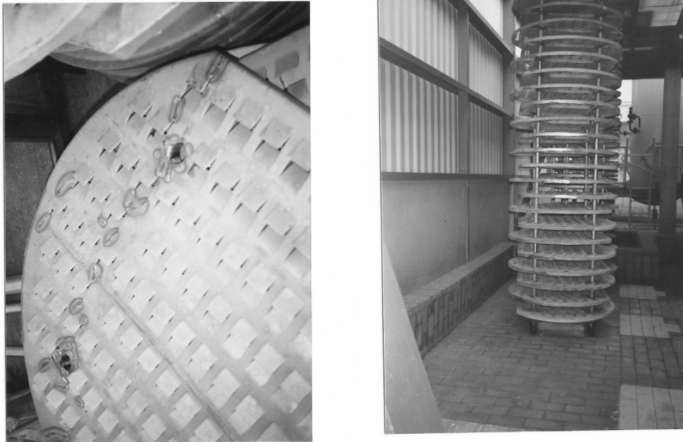
a – Leerrohr; b – Festbett; c – Wirbelschicht; d – Pulsationstrockner

Quelle: nach Heschel/Klose 1971

4 Caprolactam-Extraktion

Caprolactam wird in den Leunawerken bei Leipzig seit den 1940er-Jahren hergestellt (vgl. Pester 2014). Die Extraktion erfolgt seit 1975 in Vibrations-extraktoren (entwickelt von GIAP Moskau). Diese Extraktoren sind Kolonnen von ca. 20 m Gesamthöhe und einer Arbeitsbereichshöhe von 12 m. Darüber und darunter befinden sich Abscheidebehälter der beiden Phasen. Zur Verbesserung des Stoffübergangs von der Kontiphase zur dispersen Wasserphase sind im Arbeitsbereich ca. 100 Böden mit einem Abstand von 150 mm an einem Gestänge aufgehängt (siehe Abbildung 3, rechte Seite), das durch einen Exzentermotor in eine Schwingbewegung gebracht wird. Die Längsbewegung wird durch Gleitlager stabilisiert. Nachteilig ist, dass die Lager verschleifen und die Böden an den Aufhängungen bzw. an den Stegen zwischen den Öffnungen ermüden und reißen. Deshalb müssen die Lager von Zeit zu Zeit erneuert und die Schlitzböden ausgewechselt oder repariert werden (siehe Abbildung 3, linke Seite).

Abbildung 3: Bodenpaket (rechte Seite) und geschweißter Boden (linke Seite) des Vibrationsextraktors



Quelle: Archiv des Verfassers

Es wurde ein U-Rohr-Pulsationssystem konzipiert, das aus dem Schenkel des Industrie-Extraktors und des DN 200-Rohres bestand (siehe Abbildung 4). Für die drucklose Kolonne mit 20 m Füllhöhe wurde eine Resonanzfrequenz von 0,11 Hz errechnet und in den Versuchen 0,09 Hz gemessen. In den Jahren 2001 bis 2003 wurden Tests an drei der insgesamt vier Extraktoren durchgeführt. Diese Tests, die teilweise über mehrere Wochen verliefen, wurden bei laufender Produktion ohne vorherige Pilotversuche durchgeführt und waren sehr erfolgreich. Nach den Tests konnte wieder ohne Produktionsunterbrechung auf die Vibrationseinrichtungen umgeschaltet werden.

Die Antriebsleistung für die Vibrationseinbauten wurde mit 3,5 kW berechnet, im Original sind jedoch Motoren mit 7 kW eingebaut. Das ist normal, denn es wird der Motor häufig mit zweifacher Sicherheit bzw. Reserve verwendet. Die berechneten Werte für den Pulsationsextraktor ergaben 35 W als erforderliche Antriebsleistung. Wenn man einen Wirkungsgrad von nur 10% annimmt, wäre die Leistung immer noch nur 10% der berechneten Leistung des Vibrationsextraktors. Der Hauptvorteil der Pulsationstechnik besteht darin, dass keine beweglichen Teile im Extraktor vorhanden sind.

Abbildung 4: Extraktoren im Apparategerüst und angebaurem U-Rohrschenkel (Rohr DN 200) über dem Transporter



Quelle: Archiv des Verfassers

Literatur

- Baird, M. H. I. (1964): Patent GB 1.106.453
- Ellenberger, J.; Krishna, R. (2003): Shaken, not Stirred, Bubble Column Reactors: Enhancement of Mass Transfer by Vibration Excitement. In: *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, pp. 705-710
- Heschel, W.; Klose, E (1971): Beitrag zum Entwurf thermischer Fließbettreaktoren. In: *Chemische Technik*, Jg. 23, Nr.3, S.138-145
- Krishna, R.; Ellenberger, J. (2002): Improving Gas-liquid Contacting in Bubble Columns by Vibration Excitement. In: *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 1223-1234
- Ostrovsky, G. M. (2000): *Prikladnaja Mehanika neodnorodnych sred [Angewandte Mechanik heterogener Medien]*. Verlag Nauka. St. Petersburg (russ.)
- Ostrovsky, G. M.; Malyschew, P. A.; Axjonova, E. G. (1990): Über die Arbeit von Pulsationsapparaten im Resonanzregime. In: *Teoretitsheskije Osnovy Khimitscheskoi Tekhnologii [Theoretische Grundlagen der Chemischen Technologie]*, Jg. 24, S. 835-839
- Pester, R. (2014): Caprolactam – Eine Leuna-Geschichte. In: *Merseburger Beiträge zur Geschichte der chemischen Industrie Mitteldeutschlands*, Jg. 19, H. 1, S. 5-39
- Richardson, E. G.; Tyler, E. (1929): The Transverse Velocity Gradient Near the Mouths of Pipes in which an Alternating or Continuous Flow of Air is Established. In: *Proceedings of the Physical Society*, Vol. 42, Part 1, No. 231, pp. 1-15
- Sexl, Th. (1930): Über den von E. G. Richardson entdeckten „Annulareffekt“. In: *Zeitschrift für Physik A*, Vol. 61, S. 349-262
- Stankiewicz, A.; Moulijn, J. (eds.) (2004): *Re-Engineering the Chemical Processing Plant: Process Intensification*. New York
- Waghmare, Y. G. (2008): *Vibrations for Improving Multiphase Contact*. Dissertation. Baton Rouge (Louisiana State University, U.S.)
- Yu, B. (1994): *Untersuchungen zum Stoffaustausch in Airlift-Schlaufenreaktoren mit suspendierten Feststoffen*. Dissertation. Dortmund (Universität Dortmund) (VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 3: Verfahrenstechnik, Nr. 352)