
**EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DER HYDRODYNAMIK
AUSGEWÄHLTER KOLONNENFÜLLUNGEN**

Vladimír JIŘIČNÝ^a, Vladimír STANĚK^a, Gert GRABBERT^b, Lothar STRASSBERGER^b
und Kurt WINKLER^c

^a *Institut für theoretische Grundlagen der chemischen Technik,*

Tschechoslowakische Akademie der Wissenschaften, 165 02 Prag 6-Suchdol, Tschechoslowakei,

^b *Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik, Freiberg, DDR und*

^c *Zentralinstitut für Physikalische Chemie, Akademie der Wissenschaften der DDR,
Berlin, DDR*

Eingegangen am 13. Januar 1987

Im vorliegenden Artikel werden die Ergebnisse hydrodynamischer Untersuchungen (des Hold-up und des Druckverlustes) an ungeordneten Kolonnenfüllungen aus keramischen Pallringen und einem neuen, in der DDR entwickelten keramischen Füllkörpertyp vorgestellt. Die Messungen wurden in Kolonnen mit Innendurchmessern von 190 mm und 123 mm durchgeführt. Die Ergebnisse stimmen mit den Korrelationen des Hold-up überein, die unter der Annahme eines Automodellverhaltens von Füllkörperkolonnen gewonnen wurden.

Das Flüssigkeits-Hold-up und der Druckverlust in Füllkörperkolonnen sind wichtige hydrodynamische Parameter, die deren Verhalten charakterisieren. Die Kenntnis des Verlaufs dieser Größen in Abhängigkeit von den Phasendurchsätzen trägt zur Präzisierung von Stoffübertragungsmodellen und einer realistischeren Dimensionierung dieser Apparate bei, die in großer Vielfalt für verschiedene Prozesse (Absorption, Destillation, chemische Reaktionen) in der chemischen Industrie, aber auch vielen anderen Bereichen der Volkswirtschaft eingesetzt werden.

Die Methoden der Beschreibung der Abhängigkeit des Flüssigkeits-Hold-up von den Phasendurchsätzen für eine gegebene Geometrie der Kolonne und der Füllung sind durch die Kompliziertheit dieses Phänomens begrenzt^{1,2}. Eine mögliche Vorgehensweise zur Erfassung dieser Abhängigkeit ist die Nutzung der Automodell-eigenschaften von Füllkörperkolonnen. Dabei wird vorausgesetzt, daß sich Füllkörpersysteme ähnlich verhalten, wenn sie sich im gleichen Abstand von einem geeignet definierten Bezugspunkt, z.B. dem Flutpunkt, befinden. Eine eingehendere Analyse der Voraussetzungen für ein derartiges Automodellverhalten von Füllkörperkolonnen findet sich in den Arbeiten^{2,3}.

EXPERIMENTALER TEIL

Die Messungen wurden mit einer ungeordneten Schüttung aus keramischen Pall-Ringen 25 × × 2,5 mm in einer Kolonne mit dem Innendurchmesser von 190 mm mit den Systemen Wasser-

-Luft und Isobutylalkohol-Luft durchgeführt. Die Porosität der Schüttung war $\varepsilon = 0,726$. Die Phasenführung erfolgte im Gegenstrom, die Fluide wurden in einem geschlossenen Umlauf auf 20°C temperiert.

Gleiche Messungen wurden auch mit einer regellosen Schüttung aus an der Bergakademie Freiberg (DDR) entwickelten keramischen Füllkörpern $25 \times 15 \times 2$ mm durchgeführt (siehe Abb. 1). Die mittlere Porosität dieser zweiten Schüttung (im folgenden als K-Schüttung bezeichnet) betrug $\varepsilon = 0,842$.

Das Hold-up wurde unmittelbar unter Betriebsbedingungen mittels einer Wägemethode mit einer speziell dafür entwickelten tensiometrischen Waage ermittelt. Der Druckverlust wurde längs der Schichthöhe mit sechs elektrischen Kapazitätsmeßgebern gemessen, deren Anordnung aus Abb. 2 hervorgeht. Die Druckverluste wurden als Differenzen gegenüber dem atmosphärischen Druck gemessen.

ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

Für beide Füllkörpertypen wurde zunächst die Porosität bestimmt, indem die trockene Schüttung mit einem abgemessenen Flüssigkeitsvolumen beaufschlagt und der Pegelanstieg im Seitenrohr gemessen wurde. Die Abbildungen 3a und 3b zeigen den Verlauf der Porosität längs der Schüttung in Strömungsrichtung des Gases, d.h. von unten nach oben. In den Abbildungen sind die einzelnen Meßpunkte und auch die gleitenden Mittelwerte aus drei benachbarten Punkten, die Mittelwerte über die Abschnitte zwischen den einzelnen Druckmeßgebern und schließlich der Mittelwert über die gesamte Schüttung dargestellt.

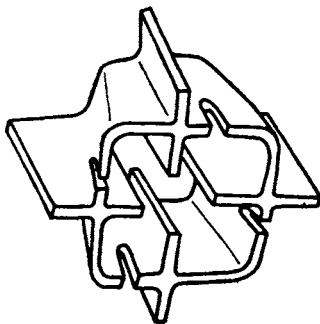


ABB. 1

Einzelement der K-Schüttung $25 \times 15 \times 2$ mm

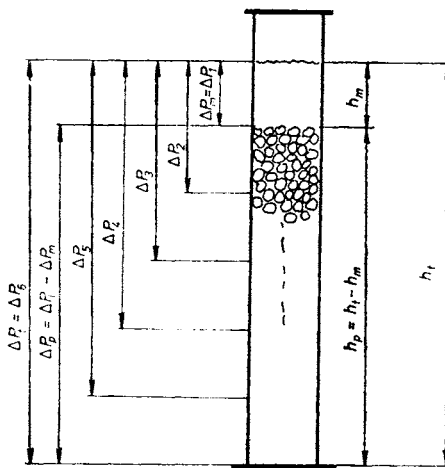


ABB. 2

Schema der Druckverlustmeßstellen längs der Kolonne

Die Verläufe der Porosität spiegeln den Einfluß der Randzonen in der Nähe des Rostes und am oberen Ende der Schüttung wieder, ebenso ist der Einfluß des sehr hohen Verhältnisses von Partikeldurchmesser zu Kolonnendurchmesser erkennbar.

Bei beiden Füllkörpertypen erfolgte die Beschickung der Kolonne durch Sedimentation der Einzelelemente in einer mit Wasser gefüllten Kolonne.

Bei den Pallringen kommt es in der Kolonne mit dem Innendurchmesser von 190 mm zu den größten Abweichungen von der Durchschnittsporosität in der Nähe des Tragrostes, d.h. am Eintritt des Gases in die Kolonne. Ein Absinken der Porosität ist auch am oberen Ende der Schüttung bemerkbar.

Bei der K-Schüttung ist der Verlauf der Porosität analog, siehe Abb. 3b. Diese Schüttung wurde wegen der begrenzten Verfügbarkeit von Füllkörpern in einer Kolonne mit dem Innendurchmesser von 123 mm untersucht. Daraus wird ersichtlich, daß sich die beiden untersuchten Fälle recht weit vom empfohlenen Verhältnis Kolonnendurchmesser zu Partikeldurchmesser 10 bis 20 : 1 befinden. In beiden Fällen ist demnach ein stärkerer Einfluß der Stirnflächen der Schüttung und der Kolonnenwand auf die Porosität zu erwarten⁴. Vor allem bei der K-Schüttung waren große Leerräume in der Schicht erkennbar, die durch die Verklemmung der Einzelkörper zustande kommen. Der Einfluß des Porositätsverlaufes längs der Schüttung auf die Strömungsverhältnisse in derselben kann durch die Profile des Druckverlustes entlang der Kolonnenhöhe dokumentiert werden. Für Pall-Ringe

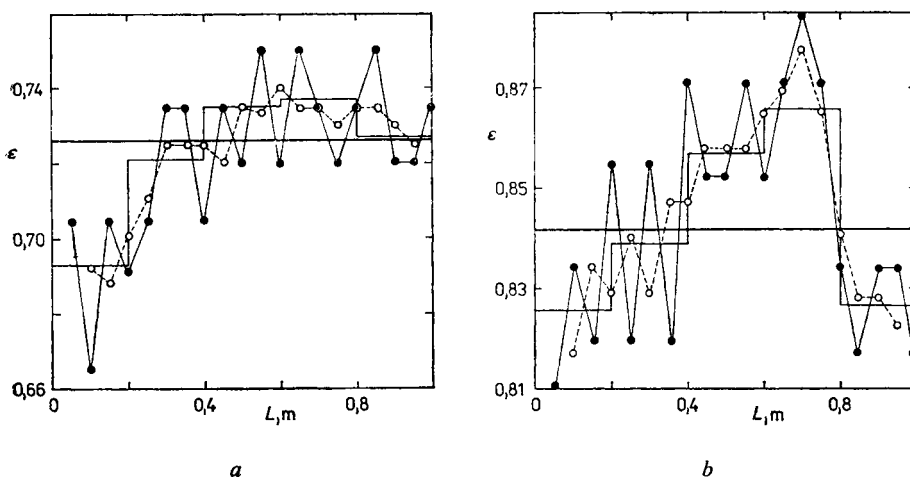


ABB. 3

Porositätsverlauf der Pallringschüttung (a) und der K-Schüttung (b). ● Einzelmeßwerte, ○ Mittelwert aus drei benachbarten Meßwerten, — dünne Linie: Stufenkonstruktion aus den Mittelwerten der einzelnen Meßabschnitte, — starke Linie: Mittelwert über die gesamte Kolonne

und das System Wasser–Luft ergibt sich die in Abb. 4 dargestellte Situation. Parameter ist hier der Gasdurchsatz.

Die Abb. 5 und 6 zeigen die Abhängigkeit des Gesamtdruckverlustes vom Gasdurchsatz für das System Wasser–Luft. Parameter ist hier der Flüssigkeitsdurchsatz. Die gestrichelte Linie verbindet die Flutpunkte, d.h. die Punkte mit den Koordinaten ΔP_{pf} , Q_{gf} . Interessanter sind die Meßergebnisse für den Druckverlust ΔP_p lediglich über die eigentliche Schüttung, wie sie in den Abb. 7 und 8 aufgetragen sind. In den Kurvenverläufen treten bei niedrigen Flüssigkeitsdurchsätzen zwei Knickpunkte auf, die sich einander mit steigendem Flüssigkeitsdurchsatz nähern. Der obere Knickpunkt entspricht definitionsgemäß dem Flutpunkt. Die gestrichelten Linien oberhalb dieser Punkte geben den Verlauf des Gesamtdruckverlustes ΔP_t an, wohingegen die ausgezogenen Linien dem Druckverlust über die eigentliche Schüttung ΔP_p entsprechen. Der Anstieg der ΔP_t - und der ΔP_p -Linien nimmt oberhalb des Flutpunktes mit steigendem Flüssigkeitsdurchsatz ab. Dieser Umstand ist durch den Charakter des Gas–Flüssigkeitsgemisches bedingt, das sich oberhalb des Flutpunktes über der Schüttung ausbildet.

Bei niedrigen Flüssigkeitsdurchsätzen führt eine Erhöhung des Gasdurchsatzes zur Bildung einer höheren Gas–Flüssigkeitsschicht oberhalb der Schüttung und zu einem raschen Anstieg von ΔP_t . Dieses Phänomen ist eng mit dem Prozeß der Emulgierung der Flüssigkeit infolge der Strömung des Gases durch die Schicht verbunden. Dieser Vorgang ist in den Abb. 7 und 8 durch die Linien begrenzt, welche die Flutpunkte (obere Knickpunkte) mit den Punkten der erwarteten Phaseninversion (untere Knickpunkte) verbinden. Mit steigendem Flüssigkeitsdurchsatz wird dieser Bereich immer schmaler, d.h. bei hohen Berieselungsdichten kommt es nicht zu einem Fluten der Kolonne infolge einer Emulgierung der Flüssigkeit durch das durchströmende Gas, sondern durch die Ausfüllung des größten Teiles des freien Volumens der Schicht durch die Flüssigkeit. Das Gas wird zur diskontinuierlichen Phase und nicht einmal sein steigender Durchsatz kann die Dichte des Gas–Flüssigkeits Gemisches oberhalb der Schicht beeinflussen.

Oberhalb des Flutpunktes ist der Anstieg der ΔP_t -Linien praktisch proportional der Geschwindigkeit der Bildung der Flüssigkeitssäule oberhalb der Schüttung in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz. Der Winkel, den die den Emulgierungsbereich begrenzenden Linien einschließen, ist der Porosität der Schüttung direkt proportional, wie aus dem Vergleich der Abb. 7 und 8 hervorgeht.

Die Abhängigkeit der Hold-up h_t vom Gasdurchsatz mit dem Flüssigkeitsdurchsatz als Parameter zeigen die Abb. 9 und 10. Die großen weißen Punkte entsprechen den Flutbedingungen, definiert durch die Koordinaten h_{pf} , Q_{gf} für ein gegebenes Q_t . Den Verlauf der kritischen Größen ΔP_{pf} , h_{pf} , Q_{gf} am Flutpunkt in Abhängigkeit vom Flüssigkeitsdurchsatz zeigen die Abb. 11–13. Aus den Abb. 11 und 12 ist der Einfluß der Oberflächenspannung für die Pall-Ring-Schüttung ersichtlich. Für einen gegebenen Flüssigkeitsdurchsatz ist bei höherer Oberflächenspannung zur

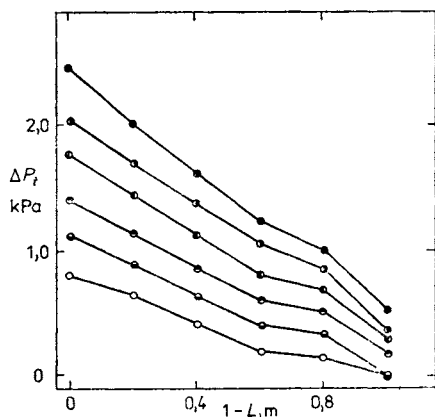


ABB. 4

Druckverlustprofile längs der Kolonne für die Pallringschüttung. System: Wasser-Luft. $Q_l = 21,55 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $Q_g = \circ 1,03$; $\bullet 1,21$; $\ominus 1,38$; $\oplus 1,60$; $\odot 1,69$; $\bullet 2,19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

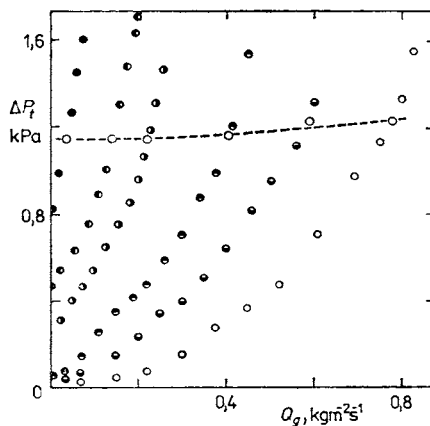


ABB. 5

Gesamtdruckverlust in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz für die Pallringschüttung. System: Wasser-Luft; $Q_l = \circ 15,68$; $\bullet 21,55$; $\ominus 27,43$; $\oplus 36,25$; $\odot 42,53$; $\bullet 48,99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

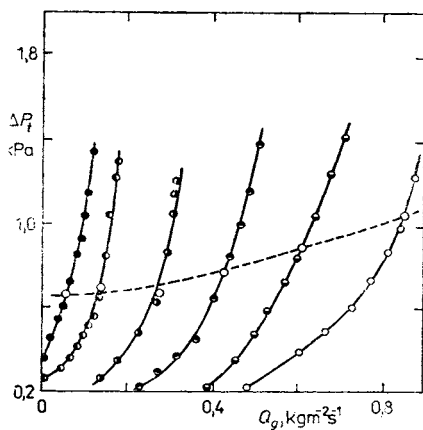


ABB. 6

Gesamtdruckverlust in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz für die K-Schüttung. System: Wasser-Luft; $Q_l = \circ 11,69$; $\bullet 21,04$; $\ominus 30,39$; $\oplus 39,74$; $\odot 49,09$; $\bullet 58,45 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

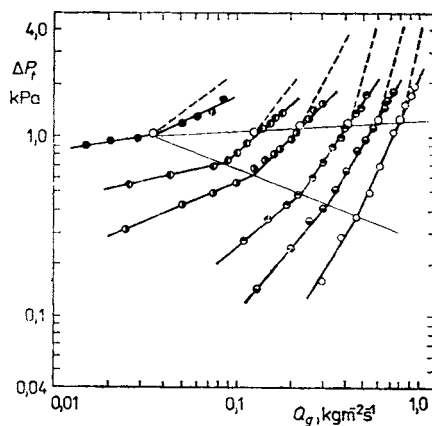


ABB. 7

Druckverlust der Pallringschüttung als Funktion des Gasdurchsatzes. Legende wie in Abb. 5

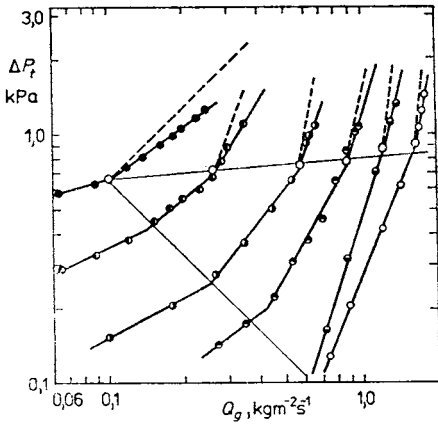


ABB. 8

Druckverlust der K-Schüttung als Funktion des Gasdurchsatzes. Legende wie in Abb. 6

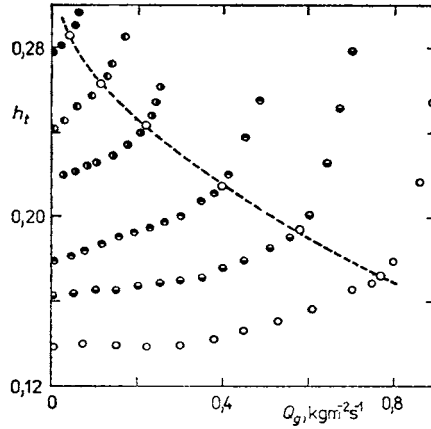


ABB. 9

Abhängigkeit des Hold-up vom Gasdurchsatz für Pallringschüttung, Legende wie in Abb. 5. ○ Flutpunkte

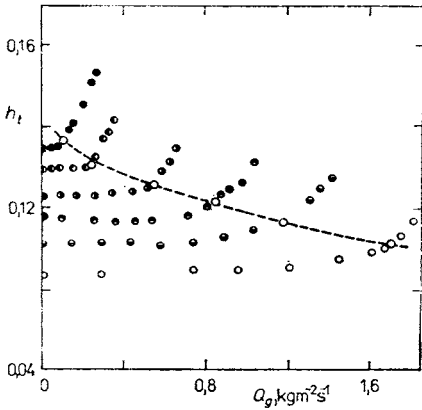


ABB. 10

Abhängigkeit des Hold-up vom Gasdurchsatz für die K-Schüttung. Legende wie in Abb. 6. ○ Flutpunkte

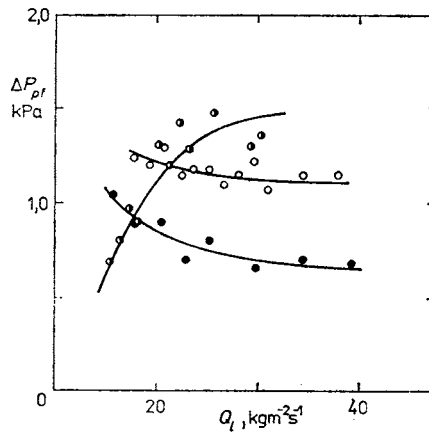


ABB. 11

Abhängigkeit der kritischen Größe ΔP_{pf} vom Flüssigkeitsdurchsatz. ○ Pallringschüttung, Wasser-Luft ● Pallringschüttung, Iso-butanol-Luft ● K-Schüttung, Wasser-Luft

Erreichung des Flutpunktes ein wesentlich höherer Gasdurchsatz erforderlich. Aus dem Vergleich beider Füllkörpertypen geht hervor, daß die K-Schüttung gegenüber der Pallringschüttung ein kleineres Hold-up und niedrigere Druckverluste aufweist.

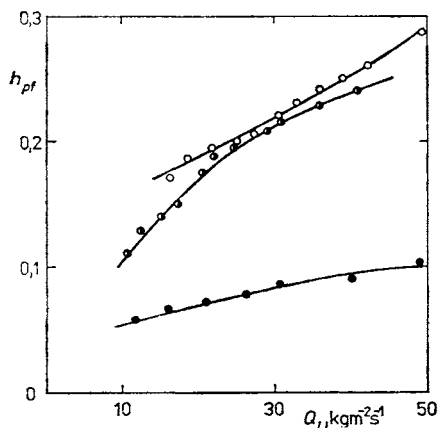


ABB. 12

Abhängigkeit der kritischen Größe h_{pf} vom Flüssigkeitsdurchsatz. Legende wie Abb. 11

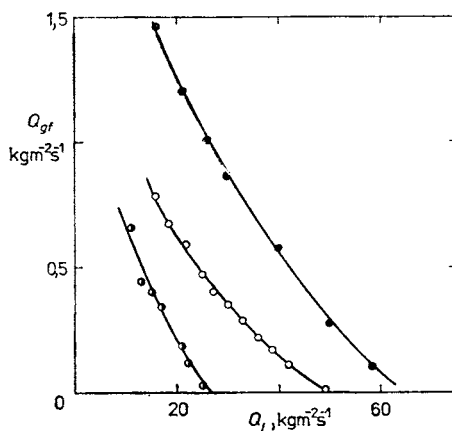


ABB. 13

Abhängigkeit der kritischen Größe Q_{gf} vom Flüssigkeitsdurchsatz. Legende wie Abb. 11

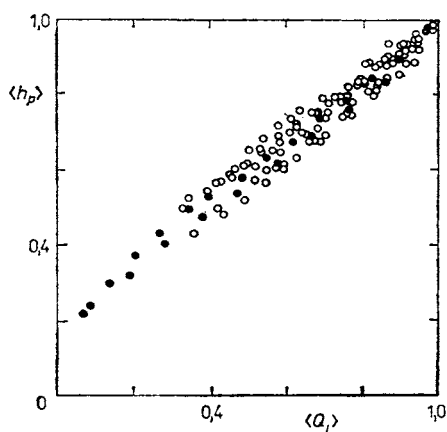


ABB. 14

Abhängigkeit des normierten Hold-up vom normierten Flüssigkeitsdurchsatz für die Pallringschüttung. System: Wasser-Luft und Isobutanol-Luft; \circ $Q_g \neq 0$; \bullet $Q_g = 0$

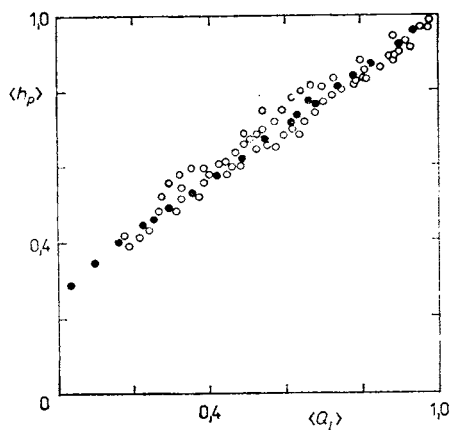


ABB. 15

Abhängigkeit des normierten Hold-up vom normierten Flüssigkeitsdurchsatz für die K-Schüttung. System: Wasser-Luft; \circ $Q_g \neq 0$; \bullet $Q_g = 0$

Überdies wird bei gegebenem Flüssigkeitsdurchsatz der Flutpunkt erst bei wesentlich höherem Gasdurchsatz erreicht.

Die Abb. 14 und 15 zeigen die Ergebnisse der Hold-up-Messungen mit beiden Füllkörpertypen, verarbeitet unter der Annahme eines Automodellverhaltens der Füllkörperkolonne. Die Übereinstimmung der Resultate für Wasser und Isobutylalkohol ist bei Pall-Ringen sehr gut (Abb. 14).

Ein Vergleich der experimentell ermittelten $\langle h_p \rangle$ -Werte mit den nach der Korrelation³

$$\langle h_p \rangle = 0,167 + 0,833 \cdot \langle Q_i \rangle \quad (1)$$

berechneten Werte zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 16). Für die K-Schüttung ist die Übereinstimmung schlechter. Die Anpassung verbessert sich, wenn die Konstanten von Gl. (1) etwas geändert werden:

$$\langle h_p \rangle = 0,27 + 0,73 \cdot \langle Q_i \rangle \quad (2)$$

was schon eine beträchtliche Abweichung gegenüber Gl. (1) darstellt. Diese Differenz ist wahrscheinlich dem ungünstigen Verhältnis Kolonnendurchmesser zu Partikeldurchmesser von nur ca. 5 anzulasten.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die durchgeführten Messungen an ungeordneten Füllkörperschüttungen zeigen, daß bei der K-Schüttung im Vergleich mit Pall-Ringen niedrigere Druckverluste und kleinere Hold-up-Werte sowie höhere Gasdurchsätze am Flutpunkt bei gleichem Flüssigkeitsdurchsatz erreicht werden können.

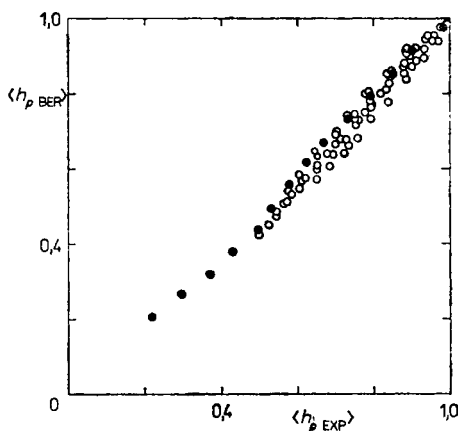


ABB. 16
Vergleich der experimentell bestimmten normierten Hold-up-Werte mit berechneten Werten für die Pallringschüttung

Messungen an einer Kolonne mit 190 mm Durchmesser, durchgeführt mit Pall-Ringen und den Systemen Wasser-Luft und Isobutylalkohol-Luft bestätigen die sehr gute Übereinstimmung mit einer universellen Korrelation, die an der gleicher Kolonne mit anderen Flüssigkeiten gewonnen wurde.

Messungen mit K-Elementen nach Abb. 1 zeigen gleichfalls einen linearen Verlauf der Abhängigkeit $\langle h_p \rangle = f(\langle Q_t \rangle)$, allerdings mit einem etwas unterschiedlichen Anstieg und Ordinatenabschnitt.

Bei Einhaltung der üblichen Durchmesserhältnisse von Kolonnen zu Füllkörperdurchmesser kann die Gültigkeit der allgemeinen Korrelation vorausgesetzt werden. Dieser spekulative Schluß muß allerdings noch experimentell untermauert werden.

In einem späteren Beitrag wird über das Stoffübertragungsverhalten beider Füllkörpertypen berichtet.

VERZEICHNIS DER SYMBOLE

h	Flüssigkeits-Hold-up, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
Q	Massenstromdichte, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$\langle Q \rangle = Q/Q_f$	normierte Massenstromdichte
L	Abstand vom Tragrost für die Packung, m
ΔP	Druckverlust, kPa
ε	Porosität, ermittelte Werte, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

Indexe

l	Flüssigkeit
g	Gas
f	kritischer Wert: Wert am Flutpunkt
t	Gesamtwert
p	Wert über die Packung
m	Wert über das Gas-Flüssigkeits-Gemisch oberhalb des Flutpunktes

LITERATUR

1. Brož Z.: *Thesis*. Czechoslovak Academy of Sciences, Prague 1965.
2. Brauer H.: *Chem. Ing. Tech.* 32, 585 (1960).
3. Jiříčný V., Staněk V.: *Collect. Czech. Chem. Commun.* 48, 3356 (1983).
4. Jiříčný V., Staněk V.: *Chem. Eng. Commun.* 35, 253 (1985).