

## Vorteile durch parallele Mengenströme bei der thermischen Stofftrennung?

Reinhard Bitter\*

Herrn Professor Dr.-Ing. Eckhart Blaß zum 65. Geburtstag

Mit Parallelströmen soll sich die Trennleistung von Stoffaustauschern (Bodenkolonnen) erhöhen lassen. Zum besseren Verständnis werden die theoretischen Grundlagen dieser Methode vertieft. Dabei zeigt sich, daß Verbesserungen nur dann zu erwarten sind, wenn im Ursprungszustand Dampf und Flüssigkeit auf und zwischen den Böden total vermischt sind. Selbst dann ist der größte Teil der erzielbaren Verbesserung nicht auf die Parallelströme zurückzuführen. Vielmehr entsteht er durch unterdrückte Rückvermischung der Flüssigkeit auf den Stufen. Weil aber in konventionellen Kolonnen einiger Größe keine totale Rückvermischung vorliegt, werden die praktisch erzielbaren Verbesserungen nur in Sonderfällen nennenswert sein. Die Methode ist also nicht ohne Grund bisher industriell kaum angewendet worden.

### 1 Versprochene Vorteile paralleler Mengenströme

Teilt man den Strom der Gasphase in einer Bodenkolonne quer zum Flüssigkeitsstrom auf den Böden in mehrere parallele Teilströme auf und sorgt für gleichsinnige Flüssigkeitsführung, so sollen sich gegenüber der „konventionellen Methode“ unter anderem die folgenden Vorteile ergeben [1]:

Bei zwei (drei) parallelen Gasströmen und einem Flüssigkeitsstrom

- nur 75 % (66 %) der sonst erforderlichen Bodenzahl und
- 33 % (50 %) Erhöhung der erzielten Konzentrationsdifferenz auf dem Boden.

Diese Methode wird auch unter dem Begriff „Paradestillation“ beschrieben [2].

Als Bezugsfall für die quantitativen Angaben zu den erzielbaren Verbesserungen dient in [1] eine Kolonne aus theoretischen Böden. Sie ließe sich durch eine Gegenstromkaskade von Rührkesseln mit idealer Vermischung oder näherungsweise von Kreuzstromböden genügend kleinen Durchmessers realisieren. Dieser Fall ist bezüglich der mittleren Triebkraft sehr ungünstig. Die zu verbessernden realen Kolonnen von nicht zu kleinem Durchmesser sind wegen der unvollständigen Vermischung insbesondere der Flüssigkeit in dieser Hinsicht schon im Vorteil. Damit ist aber klar, daß auch nur sie als vernünftiger Bezugsfall dienen können. Bevor brauchbare quantitative Angaben zu möglichen Verbesserungen gemacht werden können, muß also ein geeignetes Näherungsmodell zur Beschreibung einer konventionellen Kolonne gefunden werden.

Außerdem wurde in [1] nur der Spezialfall der Parallelität von Betriebs- und Gleichgewichtslinien betrachtet (Steigungsverhältnis 1). Die Behauptung, bei einem Steigungsverhältnis ungleich 1 und nicht-idealem Stoffaustausch ändere sich an der Nutzenabschätzung nichts Wesentliches, bleibt unbewiesen.

Erste Voraussetzung für die Ausführung des Vergleichs ist jedoch ein geeignetes Vergleichskriterium.

## 2 Vergleichskriterien

### 2.1 Kriterium für die Verbesserung der Bodentrennleistung

Um die erzielte Verbesserung der Trennleistung eines Bodens zu bewerten, wird das Verhältnis der erreichbaren Konzentrationsänderungen bei gleichen Eintrittsbedingungen mit Hilfe der Bosniakovic-Austauschverhältnisse [3] gebildet. Werden (wie überall in dieser Arbeit) Zweistoffgemische und lineare Betriebs- und Gleichgewichtslinien vorausgesetzt, so läßt sich das Verhältnis explizit angeben:

$$V_B = \frac{(1/E_{yBV} + \lambda_G)}{(1/E_{yB} + \lambda_G)} = \frac{y'' - y'}{y_V'' - y'} \quad (1)$$

Die so errechneten relativen Veränderungen der Trennleistung sind für beide Phasen gleich.

In [1] wird als Maß für die Verbesserung der Trennleistung eines Bodens statt Gl. (1) praktisch das Verhältnis der Murphree-Austauschverhältnisse der Böden gewählt. Dies bedeutet, daß der Vergleich bei gleichen Austritts-Konzentrationen der Flüssigkeit durchgeführt wird. Ein weiterer Nachteil dieser Bewertungsmethode ist es, daß für Gas und Flüssigkeit unterschiedliche relative Veränderungen anfallen, wenn das Steigungsverhältnis  $\lambda_G$  nicht wie im verwendeten Beispiel den Wert 1 besitzt.

Das vorgeschlagene neue Bewertungskriterium ergibt weit niedrigere Zahlenwerte, als in [1] angegeben.

### 2.2 Kriterium für die Verringerung der Bodenzahl

Die Bodenzahl einer Kolonne und damit auch das Verhältnis zur Bodenzahl einer Vergleichskolonne kann ebenfalls explizit angegeben werden [3].

Für  $\lambda_G \neq 1$  gilt für das Bodenzahlverhältnis als Kriterium für die Änderung der erforderlichen Bodenzahl gegenüber einem Vergleichsfall (Index V)

$$V_n = \frac{\lg(1 + (\lambda_G - 1)E_{yBV})}{\lg(1 + (\lambda_G - 1)E_{yB})} = \frac{n}{n_V} \quad (2a)$$

Für  $\lambda_G = 1$  gilt (gas- und flüssigkeitsseitige Murphree-Austauschverhältnisse der Böden sind gleich)

$$V_n = E_{yBV}/E_{yB} \quad (2b)$$

Wie die Vergleichskriterien zeigen, ist die erzielbare Verbesserung vom Steigungsverhältnis der Gleichgewichtslinie und vom Murphree-Austauschverhältnis der Böden abhängig. Letzteres hängt von der Art der Strömungsführung („Modell“), von den Austauschwiderständen und wiederum vom Steigungsverhältnis ab.

## 3 Wahl eines realistischen Bezugsfalles

Bei einer konventionellen Kolonne einiger Größe ist die Flüssigkeit nicht total vermischt. Dadurch wird die mittlere Triebkraft erhöht. Dies muß bei der Wahl des Vergleichsmodells (Bezugsfalles) unbedingt berücksichtigt werden.

Teilt man den Boden flüssigkeitsseitig in  $z$  in Reihe geschaltete ideal gerührte Zellen auf, welchen jeweils der gleiche Anteil am Gasstrom mit gleicher Konzentration zufließt (1 quervermischter Gasstrom, Modell I), so erhält man für das gasseitige Murphree-Austauschverhältnis des Bodens folgende Beziehung:

\* Dr.-Ing. R. Bitter, Bayer AG, 5090 Leverkusen-Bayerwerk.

$$E_{yB} = [(\lambda_G E_{yz} / z + 1)^z - 1] / \lambda_G \quad (3)$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß das Austauschverhältnis  $E_{yz}$  in allen Zellen gleich ist.

### 4 Vergleich der Bezugsmodelle

Wählt man entsprechend dem in [1] betrachteten Fall  $\lambda_G = 1$ ,  $E_{yz} = 1$  und  $z = 2$ , so wird für das neue Modell nach Gl. (3)  $E_{yB} = 5/4$ . Für das in [1] vorgeschlagene Bezugsmodell gilt aber  $E_{yBV} = 1$ . Das Bewertungskriterium für die Bodenzahl ergibt nun, daß für dieses Beispiel schon die gewählte geringe Unterdrückung der Flüssigkeits-Rückvermischung eine Einsparung von 20 % gegenüber einer Kolonne aus theoretischen Böden ergibt.

Das vernünftig gewählte Bezugsmodell zeigt also, daß für die Einsparung an Böden durch Übergang zu 2 parallelen Gasströmen bei diesem Beispiel nicht ein Wert von 25 %, sondern nur von etwa 5 % zu erwarten ist, wenn nicht im Labormaßstab gearbeitet wird. Unbedachte Maßstabs-Vergrößerungen sind also zum Scheitern verurteilt.

Eine genauere Analyse mit Hilfe weiterer Modelle zeigt, daß die geringe zusätzliche Verbesserung durch parallele Gasströme außerdem nur erreicht wird, wenn gleichzeitig auf gleichsinnige Flüssigkeitsführung in der Kolonne übergegangen wird. Zudem zeigt sie im Gegensatz zu den Aussagen in [1] einen starken Einfluß des Steigungsverhältnisses und des Austauschwiderstandes auf die relativen Verbesserungen. Die Verbesserung wird mit zunehmendem Austauschwiderstand in vielen Fällen erheblich kleiner. Die Wirkung beider Größen wird grafisch dargestellt.

Die Bedeutung der Flüssigkeitsrückvermischung wurde schon von *H. Hausen* erkannt und führte zur Entwicklung des sog. Ringbodens [4], für dessen Wirkung aber vermutlich ähnliche Einschränkungen im Hinblick auf den Kolonnendurchmesser gemacht werden müssen, wenn nicht als Nebenwirkung die hier nicht diskutierte Verteilung der Flüssigkeit verbessert wird.

Eingegangen am 13. März 1990

### Formelzeichen

$E$	Murphree-Austauschverhältnis
$\lambda$	Steigungsverhältnis bezogen auf die Steigung der Betriebslinie der Kolonne
$V$	Vergleichsverhältnis
$y$	Konzentration des Gases
$z$	Zahl der Zellen in Flüssigkeitsrichtung auf einem Boden

### Indices

B	Boden (Stufe)
G	Gleichgewichtslinie
V	Vergleichswert
n	Bodenzahl
y	mit den Konzentrationen der Gasphase gebildet
z	Boden-Zelle
,	Eintritt
„	Austritt

### Literatur

[1] *Heucke, Chr.*: Chem.-Ing.-Tech. 59 (1987) Nr. 2, S. 107/111.

[2] *Canfield, F. B.*: Chem. Eng. Prog. (1984) Feb., S. 58/62.

[3] *Bitter, R.*: Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) Nr. 8, S. 694/695, MS 1387/1985.

[4] *Hausen, H.*: Forsch. Ingenieurwes. 7 (1936) Nr. 4, S. 177/186.

*Schlüsselworte:* Stoffaustauscher, Paradestillation, Trennleistung, Austauschverhältnis, Bodenzahl, Strömungsführung.

Das vollständige Manuskript dieser Arbeit umfaßt 32 Seiten mit 11 Abbildungen, 1 Tabelle und 10 Literaturzitaten. Es ist als Fotokopie oder Mikrofiche MS 1880/90 erhältlich.