

Prom. Nr. 3080

Über die Flüssigkeitsdurchmischung und die Schaumbildung auf Siebböden

Von der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von
ARNOLD MÜTZENBERG

dipl. Masch.-Ing. E. T. H.
von Spiez (Kt. Bern)

Referent: Herr Prof. Dr. P. Grassmann
Korreferent: Herr Prof. Dr. A. Guyer

Juris-Verlag Zürich
1961

Meinen Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	5
Ziel und Inhalt der vorliegenden Arbeit	6
1. Der Einfluss der Flüssigkeitsdurchmischung auf das Verstärkungsverhältnis	7
2. Die Versuche	12
2.1. Die Versuchsböden	12
2.2. Die Messung des Verweilzeitspektrums	12
2.3. Die Messung des Verstärkungsverhältnisses	15
2.4. Das Messverfahren	15
2.5. Die Berechnung des Verstärkungsverhältnisses	15
2.6. Die Ergebnisse	16
3. Der Stoffaustausch im dynamischen Schaum	19
3.1. Die Kinematik des dynamischen Schaumes	19
3.2. Die Berechnung des Stoffaustausches im dynamischen Schaum	24
3.3. Vergleich des Stoffaustausches im dynamischen Schaum mit ähnlichen Strömungen	25
3.4. Die Vorausberechnung des lokalen Verstärkungsverhältnisses	27
4. Die Flüssigkeitsdurchmischung auf Siebböden	28
4.1. Die Darstellung der Durchmischung mittels dem Verweilzeitspektrum	28
4.2. Die Versuche zur Erklärung der Flüssigkeitsdurchmischung	32
5. Zusammenfassung	36
6. Bezeichnungen	37
7. Literaturverzeichnis	39
8. Anhang	41
8.1. Herleitungen	41
8.2. Mess- und Auswertprotokolle	44

Leer - Vide - Empty

Vorwort

Die Durchführung dieser Arbeit wurde durch einen Arbeitsbeschaffungskredit (No. 587) des Bundes ermöglicht. Der Institution sei hiermit der verbindlichste Dank ausgesprochen.

Angeregt und entscheidend gefördert wurde die Arbeit von Herrn Prof. Dr. P. Grassmann. Für sein stetes Interesse und seine entscheidende Unterstützung möchte ich ihm herzlichst danken.

Für die Uebernahme des Korreferates bin ich Herrn Prof. Dr. A. Guyer äusserst dankbar, nicht zuletzt auch, weil ich an seinem Institut wesentliche Versuche durchführen konnte.

Bei den Arbeitskollegen im Maschinenlaboratorium der Eidgenössischen Technischen Hochschule, wo die Messungen durchgeführt wurden, sowie bei Herrn K. Pfister vom Photographischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule, möchte ich mich ebenfalls für ihre Unterstützung durch Rat und Tat aufs Beste bedanken.

Ziel und Inhalt der vorliegenden Arbeit

In der Chemie-Ingenieur-Technik ist der Rektifizierboden ein häufig verwendetes Bauelement, dazu dienend, den Stoff- und Wärmeaustausch zwischen einem Dampf und einer Flüssigkeit zu ermöglichen. Obschon seit Jahren Rektifizierböden arbeiten, ist deren Wirkungsweise und damit die Möglichkeit der Vorausberechnung der Wirksamkeit, das heisst des Verstärkungsverhältnisses, noch nicht vollständig erforscht.

Wie Grassmann²³⁾ gezeigt hat, können die komplexen Vorgänge, die sich auf einem Rektifizierboden abspielen, in einzelne Teilprobleme zerlegt werden, von welchen in der vorliegenden Arbeit die Flüssigkeitsdurchmischung, deren Einfluss auf das Verstärkungsverhältnis sowie der dynamische Schaum als zweiphasige Strömung und als Kontaktzone zwischen Dampf und Flüssigkeit untersucht wird.

Indem die Flüssigkeitsdurchmischung durch das Verweilzeitspektrum charakterisiert wird, ist in einem ersten Abschnitt eine Beziehung zwischen Flüssigkeitsdurchmischung und Verstärkungsverhältnis hergeleitet. Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen hat sie sich bewährt. Ihre Anwendung zur Vorausberechnung des Verstärkungsverhältnisses setzt die Kenntnis des lokalen Verstärkungsverhältnisses (Murphree local efficiency) und des Verweilzeitspektrums voraus. In zwei weiteren Abschnitten sind die Aussichten, diese in starkem Masse vom dynamischen Schaum beeinflussten Grössen vorausberechnen zu können, diskutiert.

1. Der Einfluss der Flüssigkeitsdurchmischung auf das Verstärkungsverhältnis

Beim Bestreben, das Verstärkungsverhältnis s'' eines Bodens (Murphree plate efficiency) in Beziehung zu demjenigen einer einzelnen Stelle (Murphree local efficiency) zu bringen, tritt als wesentliche Unbekannte die Konzentrationsverteilung in der Flüssigkeit über dem Boden auf. Diese Verteilung ist durch die Flüssigkeitsdurchmischung gegeben. Unter sehr vereinfachenden Annahmen, nämlich keine oder vollständige Durchmischung, haben Hausen³⁰⁾, Kirschbaum³⁴⁾ und Lewis⁴⁰⁾ Beziehungen angegeben. Dem tatsächlichen Zustand auf dem Rektifizierboden besser Rechnung tragend, ist das Vorgehen von Gautreaux und O'Connell¹⁷⁾, das die Flüssigkeit durch einzelne vollkommen durchmischte Abteile strömend annimmt. Dies führt zu der Beziehung (1) zwischen dem lokalen und dem Bodenverstärkungsverhältnis

$$s'' = \frac{\dot{L}}{m \dot{V}} \left[\left(1 + \frac{s_L}{n} \cdot \frac{m \dot{V}^n}{\dot{L}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Die eigentliche Messung der Flüssigkeitsdurchmischung wurde erst möglich, nachdem deren Zusammenhang mit dem Verweilzeitspektrum erkannt war¹³⁾. Solche Messungen wurden in jüngster Zeit durch Foss¹⁵⁾, Gerster¹⁸⁾ und Gilbert²⁰⁾ gemacht. Den Einfluss der durch das Verweilzeitspektrum gemessenen Flüssigkeitsdurchmischung auf das Verstärkungsverhältnis s'' gibt die im folgenden abgeleitete Beziehung (10):

Die Aehnlichkeit des Rektifizierbodens mit dem kontinuierlich betriebenen Reaktor, bei beiden erfolgt ja während einer Strömung eine Umsetzung, legt es nahe, Beziehungen des letzteren übernehmen zu können. Die relative Ausbeute⁶⁾ A_{rel} eines Reaktors berechnet sich nach Schoenemann⁴⁹⁾

$$A_{rel} = \int_0^{\infty} U(t/\tau) \cdot V(t/\tau) \cdot d(t/\tau) \quad (2)$$

Dabei bedeutet A_{rel} den Anteil der umgesetzten Menge von der maximal umsetzbaren, $U(t/\tau)$ die Umsatzkurve, das heisst der zeitliche Verlauf der Umsetzung im diskontinuierlichen Versuch und $V(t/\tau)$ das Verweilzeitspektrum.

Die Umsatzkurve $U(t/\tau)$ lässt sich wie folgt berechnen: In einem Gefäss sei eine bestimmte Anzahl kmol L Flüssigkeit der Anfangskonzentration x_0 . Durch diese Flüssigkeit wird die zeitlich konstante Anzahl kmole Dampf \dot{V} der Eintritts-

konzentration y_{∞} durchgeleitet, wobei zwischen der flüssigen und der dampfförmigen Phase ein Stoffaustausch stattfindet. Der Dampf verlässt die Austauschzone mit der Konzentration y_{ω} . Stellt man die Stoffbilanz für eine Komponente, meist der leichterflüchtigen, über die ganze Zone auf, so gilt

$$\dot{V} dt (y_{\omega} - y_{\infty}) = -L dx \quad (3)$$

Vollzieht sich der Austausch vollständig, so hat der austretende Dampf die Gleichgewichtskonzentration $y^*(x)$ zur Flüssigkeit. Die tatsächliche Anreicherung ist jedoch nicht vollständig; sie ist durch das lokale Verstärkungsverhältnis s_L gegeben

$$s_L = \frac{y_{\omega} - y_{\infty}}{y^*(x) - y_{\infty}} \quad (4)$$

Setzt man (4) in (3) ein, so erhält man die Differentialgleichung

$$-\int_0^t \frac{\dot{V}}{L} dt = \int_{x_0}^x \frac{dx}{s_L (y^*(x) - y_{\infty})} \quad (5)$$

Unter den Annahmen:

1. s_L ist konstant
2. y_{∞} ist konstant
3. die Gleichgewichtskurve lässt sich durch die Gerade

$$y^*(x) = y^*(x_0) + m(x - x_0) \quad \text{mit } m = \frac{dy^*}{dx}$$

darstellen, und mit der Einführung der Zeit $\tau'' = L/\dot{V}$, das ist die Zeit, die benötigt wird, um die L kmole Flüssigkeit mit der gleichen Anzahl kmolen Dampf in Berührung zu bringen, lässt sich (5) in den angegebenen Grenzen integrieren:

$$\frac{y^*(x) - y_{\infty}}{y^*(x_0) - y_{\infty}} = e^{-m \cdot s_L \cdot \frac{\dot{V}}{L} \cdot t} = e^{-m \cdot s_L \cdot \frac{t}{\tau''}} \quad (6)$$

Die Zeit $\tau'' = \frac{L}{\dot{V}}$ kann durch Einführung des Rücklaufverhältnisses

$$v = \frac{\dot{L}}{\dot{V} - \dot{L}} \quad \text{daraus folgt} \quad \dot{V} = \dot{L} \frac{1 + v}{v}$$

geschrieben werden als

$$\tau'' = \frac{L}{\dot{L}} \cdot \frac{v}{v+1}$$

$\frac{L}{\dot{L}}$ ist die übliche Definition der mittleren Verweilzeit τ , das heisst derjenigen Zeit, die ein Flüssigkeitsstrom \dot{L} im Mittel benötigt, um ein Gefäss mit dem Flüssigkeitsinhalt L zu durchströmen. Es gilt also

$$\tau'' = \tau \cdot \frac{v}{v+1}$$

Die Umsatzkurve $U(t/\tau)$ ist der zeitliche Verlauf des Quotienten aus der tatsächlichen Konzentrationsänderung des Dampfes $y^*(x_0) - y^*(x)$ zur Maximal möglichen $y^*(x_0) - y_\infty$, (dann ist nämlich die Konzentration der Flüssigkeit im Gleichgewicht zum eintretenden Dampf)

$$U(t/\tau) = \frac{y^*(x_0) - y^*(x)}{y^*(x_0) - y_\infty}$$

und kann mittels Gleichung (6) berechnet werden:

$$U(t/\tau) = 1 - \frac{y^*(x) - y_\infty}{y^*(x_0) - y_\infty} = 1 - e^{-m \cdot s \cdot L \cdot \frac{v+1}{v} \cdot t/\tau} \quad (7)$$

Mit Gleichung (7) und dem Verweilzeitspektrum $V(t/\tau)$ ist die relative Ausbeute A_{rel} nach (2) bestimmt:

$$A_{\text{rel}} = \int_0^\infty V(t/\tau) \left[1 - e^{-m \cdot s \cdot L \cdot \frac{v+1}{v} \cdot t/\tau} \right] d(t/\tau) \quad (8)$$

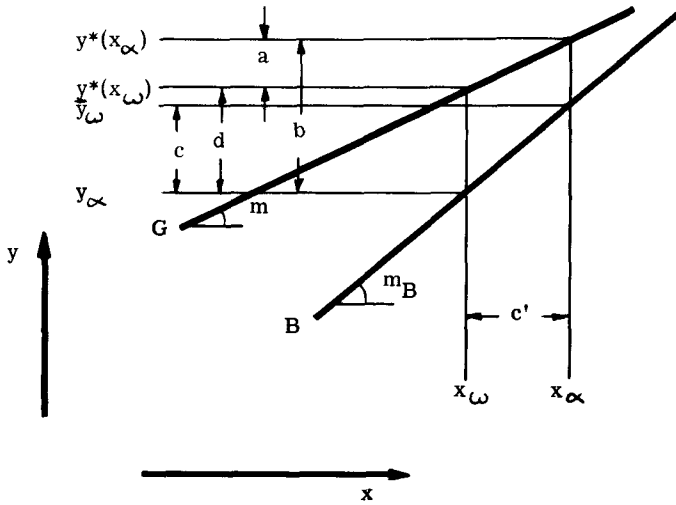
Der Zusammenhang zwischen A_{rel} und dem Verstärkungsverhältnis s'' sei anhand von Figur 1 (Seite 10) erläutert.

B bedeutet die Bilanzgerade (= Arbeitsgerade) mit der Steigung $m_B = \dot{L}/\dot{V}$; G ist die durch eine Gerade angenäherte Gleichgewichtskurve mit der Steigung m .

Aus Figur 1 lassen sich die folgenden geometrischen Gegebenheiten entnehmen:

$$s'' = \frac{\bar{y}_\omega - y_\infty}{y^*(x_\omega) - y_\infty} = \frac{c}{d}$$

$$A_{\text{rel}} = \frac{y^*(x_\alpha) - y^*(x_\omega)}{y^*(x_\alpha) - y_\infty} = \frac{a}{b}$$



Figur 1

$$c' = c/m_B = a/m \quad \text{daraus folgt } c = a \frac{m_B}{m}$$

Setzt man die Beziehung $c = a \frac{m_B}{m}$ und $d = b - a$ (siehe Figur 1) in die Gleichung für s'' ein und drückt dann a/b durch A_{rel} aus, so folgt unter Einführung des Rücklaufverhältnisses

$$v = \frac{\dot{L}}{\dot{V} - \dot{L}} = \frac{\frac{\dot{L}}{\dot{V}}}{1 - \frac{\dot{L}}{\dot{V}}} = \frac{m_B}{1 - m_B} \quad \text{oder}$$

$$m_B = \frac{v}{1 + v}$$

für das Verstärkungsverhältnis s'' die Beziehung

$$s'' = \frac{1}{m \frac{1+v}{v}} \cdot \frac{A_{rel}}{1 - A_{rel}} \quad (9)$$

Ersetzt man A_{rel} in (9) durch die Gleichung (8), so folgt die gesuchte Beziehung (10)

$$s'' = \frac{\int_0^{\infty} V(t/\tau) [1 - \exp(-ms_L(t/\tau) \frac{1+\nu}{\nu})] d(t/\tau)}{m \cdot \frac{1+\nu}{\nu} \left\{ 1 - \int_0^{\infty} V(t/\tau) [1 - \exp(-ms_L(t/\tau) \frac{1+\nu}{\nu})] d(t/\tau) \right\}} \quad (10)$$

=====

Die Beziehung (10) erlaubt die Vorausberechnung des Verstärkungsverhältnisses s'' , wenn das Verweilzeitspektrum $V(t/\tau)$, das lokale Verstärkungsverhältnis s_L , das Arbeitsgebiet (m) und das Rücklaufverhältnis ν bekannt sind.

Anmerkung:

Die Beziehung (10) lässt sich auf die Beziehung (1) zurückführen, wenn man für das Verweilzeitspektrum die von Schoenemann⁴⁹⁾ explizite gegebenen Formeln für n in Serie geschaltete Gefäße einsetzt.

2. Die Versuche

Das Ziel war, die gemessenen und die nach Beziehung (10) berechneten Werte für das Verstärkungsverhältnis s'' vergleichen zu können.

2.1. Die Versuchsböden

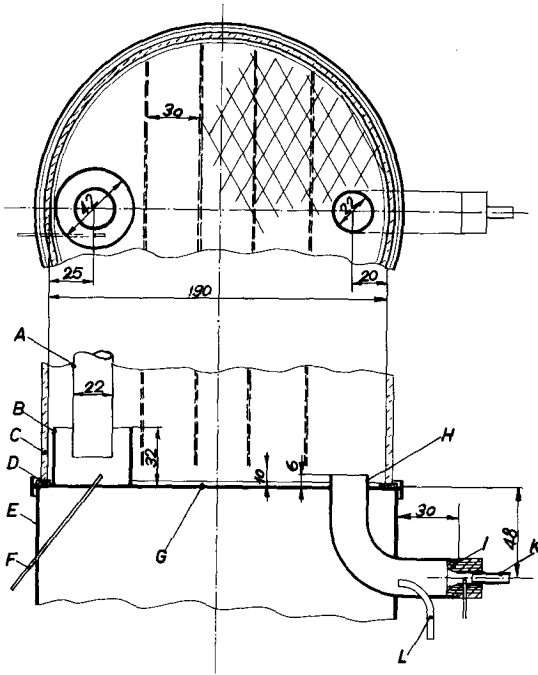
Für zwei schon bestehende Rektifizierkolonnen der Eidgenössischen Technischen Hochschule wurden eigens Siebböden hergestellt, deren Aufbau und Hauptabmessungen aus den Figuren 2 und 3 zu entnehmen sind. Der Lochdurchmesser (1,8 mm) und der Lochabstand (9,2 mm) war bei beiden Böden gleich. Sie konnten während dem Betrieb von oben und von unten beobachtet werden, um die Schaumhöhe messen und ein eventuelles Durchtropfen feststellen zu können.

Am kleinen Boden konnten zur Veränderung des Verweilzeitspektrums Einbauten angebracht werden. Diese bestanden aus 10 cm hohen Glasplatten, die senkrecht zur Strömungsrichtung bis auf 1 cm über den Boden hineingehängt wurden. (In Figur 1 durch gestrichelte Linien dargestellt.)

2.2. Die Messung des Verweilzeitspektrums

Das Verfahren bestand darin, eine kleine Menge Elektrolyt kurzzeitig in die dem Boden zulaufende Flüssigkeit einzuspritzen, und dann den zeitlichen Verlauf der Konzentration an Elektrolyt in der Flüssigkeit am Bodenablauf aufzunehmen. Dieser Verlauf entsprach dem Verweilzeitspektrum zwischen Einspritzstelle und Messstelle.

Eingespritzt wurde LiCl-Lösung, wobei die Menge so gering war, (sie betrug zwischen 0,02 und 1 g LiCl), dass keine Aenderung der Arbeitsweise des Bodens festgestellt werden konnte. Die Einspritzdauer ($\approx 0,5$ sec) war verglichen mit der Dauer der Aufnahme des Spektrums (40 bis 300 sec) vernachlässigbar. Die Konzentration wurde über die elektrische Leitfähigkeit gemessen; an Durchflussmesszellen, die mit Wechselstrom von 200 kHz gespeist waren, wurde die Spannung über den Elektroden, das Mass für die Leitfähigkeit, durch einen registrierenden Kompensator (Philips PR 2210 A/21) in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet. Mittels einer Eichkurve Spannung - Konzentration konnte daraus der gesuchte Konzentrationsverlauf ermittelt werden (Beispiel in Figur 11).

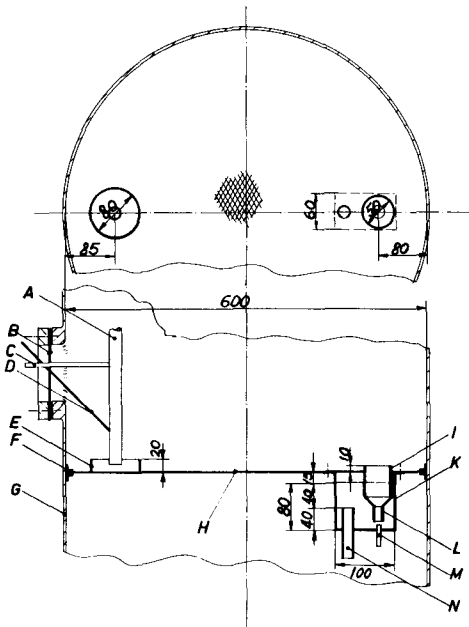


Figur 2

Die gestrichelten Linien deuten die Lage der Einbauten an

Legende zu Figur 2

- A Zulaufrohr (Material Cu)
- B Einlaufbecher (Cu)
- C Glasschuss (Pyrexglas, 5 mm Wandstärke, 130 mm hoch)
- D Dichtungsring (Buna)
- E Schuss (Cu)
- F Einspritzkapillare (rostfreier Stahl, 1,2/1,5 mm, 90 mm lang)
- G Siebboden (Cu, 1,5 mm dick) mit 170 Löchern zu 1,8 mm Durchmesser und 9,2 mm Lochabstand, auf Eckpunkten von gleichseitigen Dreiecken angeordnet)
- H Ueberlauf (Cu)
- I Leitfähigkeitsmesszelle (in Araldit eingegossene Reinnickelelektroden mit abgeschirmtem Zuführungskabel)
- K Rückleitung zur Blase (Cu + PVC - Schlauch)
- L Probenentnahmerohr (Cu, 5 mm Aussendurchmesser)



Figur 3

Legende zu Figur 3

- A Zulaufrohr (Ms, 18 x 21 mm)
- B Messingplatte anstelle der Beobachtungsgläser, mit eingelöteten Durchführungen
- C Probenentnahmerohr (Cu, 6 mm Aussendurchmesser)
- D Einspritzkapillare (rostfreier Stahl, 1,2/1,5 mm, 270 mm lang)
- E Einlaufbecher (Ms)
- F Spannringe
- G Kolonnenwandung (rostfreier Stahl)
- H Siebboden (Ms, 1,5 mm dick) mit 3000 Löchern zu 1,8 mm Durchmesser und 9,2 mm Lochabstand, auf den Eckpunkten von gleichseitigen Dreiecken angeordnet)
- I Ueberlauf (Ms)
- K Syphongefäß (Ms)
- L Leitfähigkeitsmesszelle (Reinnickelrohr 15 x 17 als eine Elektrode, mit Aralditträger in Rohraxe festgehaltener Reinnickelstab 2 x 0,5 x 12 mm als zweite Elektrode), mit abgeschirmtem elektrischen Zuführungskabel, das durch einen Teflonschlauch geschützt wird.
- M Probenentnahmerohr (Ms)
- N Ablaufrohr

2.3. Die Messung des Verstärkungsverhältnisses

Das auf die Dampfphase bezogene Verstärkungsverhältnis s'' wurde aus den Konzentrationen der zu- und abfließenden Flüssigkeit bestimmt. Die Probe-Entnahmeröhrchen (Figur 2 und 3) wurden mit der zu untersuchenden Flüssigkeit durchgespült, um danach ungefähr 10 cm^3 davon in kleine Erlenmayer abzapfen. Die Konzentration wurde über den Brechungsindex (mit Refraktometer Marke Zeiss Opton) oder über die Dichte (mit Krutzmeter nach Dr. Ing. Johs. Krutzsch, München-Solln) bestimmt. Die Gleichgewichtskurve des Gemisches Aethanol-Wasser wurde³⁵⁾ entnommen, diejenige des Gemisches Methanol-Aethanol aus¹⁾, wobei letztere Werte mit den an einer Phasengleichgewichtsapparatur (nach Dr. Stage) selbst gemessenen übereinstimmten.

Die Genauigkeit der gemessenen Verstärkungsverhältnisse lag bei $\pm 2 \%$.

2.4. Das Messverfahren

Nach ein bis anderthalb Stunden war der Beharrungszustand in der Kolonne erreicht. Es wurden dann vor und nach der Aufnahme des Verweilzeitspektrums die Flüssigkeitsproben entnommen. Die zwischen den Entnahmen liegende Zeitdauer betrug ungefähr 10 Min. Die Aenderung des Betriebszustandes beschränkte sich beim grossen Boden auf die Verstellung des Rücklaufverhältnisses ν . Beim kleinen Boden konnte mittels einer Schlauchklemme in der Rückleitung zur Blase die Flüssigkeitsmenge auf dem Boden variiert werden. Dadurch ergaben sich andere Schaumhöhen und damit andere Verweilzeitspektren. Es wurden Versuche mit und ohne Einbauten (vergleiche 2.1.) gemacht.

2.5. Die Berechnung des Verstärkungsverhältnisses

Die Beziehung (10) lieferte den vorausberechneten Wert für das Verstärkungsverhältnis mit einer Genauigkeit von $\pm 3 \%$. Die Integrale der Beziehung (10) wurden dabei graphisch auf Grund der empirisch bestimmten Verweilzeitspektren durch Ausplanimetrieren gelöst.

Das zur Auswertung benötigte lokale Verstärkungsverhältnis s_L wurde durch

Vorversuche bestimmt, die von der Tatsache ausgingen, dass das Verstärkungsverhältnis eines Rektifizierbodens bei vollkommener Flüssigkeitsdurchmischung gleich dem lokalen Verstärkungsverhältnis wird⁵⁰⁾. Die Werte sind in den Figuren 4 und 5 aufgetragen.

2.6. Die Ergebnisse

In den Protokollen im Anhang Abschnitt 8.2. sind die Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen zusammengestellt. Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

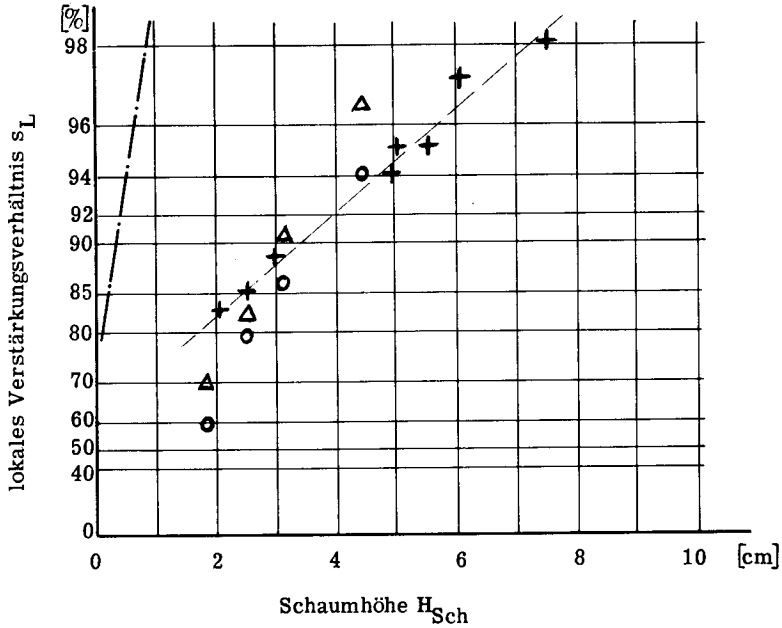
1. Die Gültigkeit der Beziehung (10).

Mit den früher angegebenen Grenzen der Genauigkeit der Messung ($\pm 2\%$) und der Berechnung ($\pm 3\%$) des Verstärkungsverhältnisses s'' müsste die relative Abweichung dieser beiden Werte innerhalb $\pm 5\%$ liegen. Dies trifft tatsächlich mit einer Ausnahme (Protokoll 4, Schaumhöhe 38 mm) zu, was bestätigt, dass die Beziehung (10) in den von uns gewählten Parametern gültig ist.

Dass sie aber nicht allgemein für andere Bodentypen anwendbar ist, haben Versuche an einem Glockenboden gezeigt, indem dort das berechnete Verstärkungsverhältnis bis 20% über dem gemessenen lag. Die Begründung ist wohl darin zu finden, dass beim Glockenboden Flüssigkeit zwischen den Glocken durchströmen kann, ohne je mit dem Dampf in Berührung zu kommen, während die Beziehung (10) diese Berührung für alle Flüssigkeit voraussetzt.

2. Der Einfluss der Einbauten.

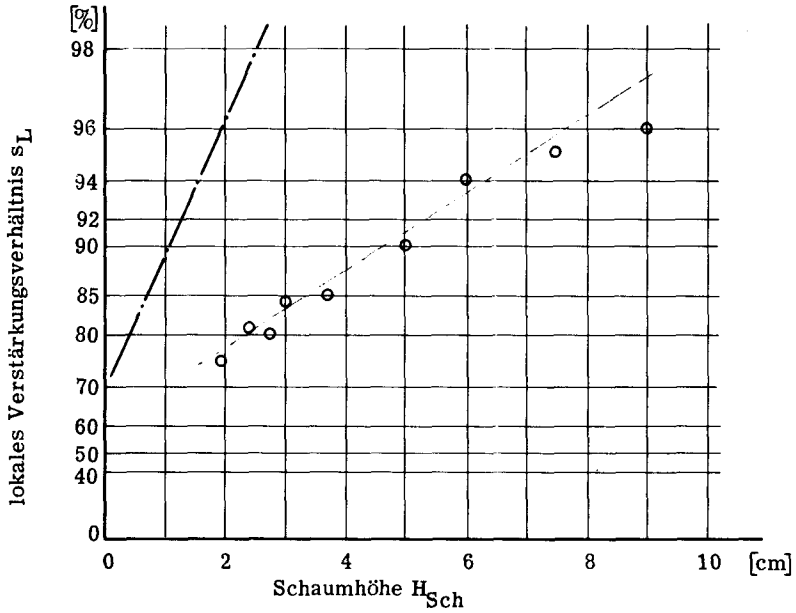
Der Vergleich der Protokolle 1 mit 3, beziehungsweise 2 mit 4 zeigt, dass die Einbauten gemäss Figur 2 eine mittlere Zunahme des Verstärkungsverhältnisses von 20% einbrachten. Die Wirkungsweise der Einbauten ist in 4.2. beschrieben.



- Messungen nach Anderès²⁵⁾
Düsendurchmesser 1,5 mm; Dampfgeschwindigkeit 12,6 m/s
- △ Messungen nach Carey⁷⁾ Schlitzbreite 1/4 " (6,35 mm)
- Schlitzbreite 1/2 " (12,7 mm)
- + eigene Messungen
Düsendurchmesser 1,8 mm; Dampfgeschwindigkeit 6 ÷ 8 m/s

Abhängigkeit des lokalen Verstärkungsverhältnisses s_L von der Schaumhöhe H_{Sch} bei der Rektifikation des Gemisches Aethanol-Wasser

Figur 4



- Messungen nach Anderès²⁵⁾
Düsendurchmesser 1,5 mm; Dampfgeschwindigkeit 12,5 m/s
- o eigene Messungen
Düsendurchmesser 1,8 mm; Dampfgeschwindigkeit 6 + 8 m/s

Abhängigkeit des lokalen Verstärkungsverhältnisses s_L von der Schaumhöhe H_{Sch} bei der Rektifikation des Gemisches Methanol-Aethanol

Figur 5

3. Der Stoffaustausch im dynamischen Schaum

Ziel dieses Abschnittes ist es, den Stoffaustausch zwischen der dampf- beziehungsweise gasförmigen und der flüssigen Phase, in einer sich ständig erneuernden Schaumschicht, dem dynamischen Schaum, zu beschreiben. Die Möglichkeiten der Vorausberechnung des lokalen Verstärkungsverhältnisses seien diskutiert.

In den folgenden Ausführungen gelte die schon andernorts²⁷⁾ gemachte Annahme, wonach die Kinematik der zweiphasigen Strömung von einem gleichzeitigen Stoffaustausch unabhängig sei.

3.1. Die Kinematik des dynamischen Schaumes

An einem mit Wasser und Luft betriebenen Modell eines Siebbodens wurden Versuche gemacht, indem mit einer Filmkamera (Marke Fastax, Firma Wollensak, Rochester, N.Y.) Zeitdehnerfilme mit Bildfrequenzen bis 4000 Hz aufgenommen wurden. Die Auswertung dieser Filme zeigte, dass die Frequenz f der Schaumblasenbildung^{*} innerhalb enger Grenzen zwischen 15 - 20 Hz lag. Diese Feststellung ist in Übereinstimmung mit Angaben aus der Literatur:

Nach Calderbank⁹⁾ ist die Bildungsfrequenz unabhängig von der durchströmenden Gasmenge und beträgt 15 - 20 Hz.

Hayes³¹⁾ gibt eine Formel, die in ihrer Anwendung etwas umständlich ist, dafür aber für zähe Flüssigkeiten (bis 10 Poise) bestätigt gefunden wurde.

Die von Grossmann²⁹⁾ bestätigte Formel von van Krevelen und Hoftijzer³⁸⁾ gibt den Durchmesser der kugelförmigen Blase in Abhängigkeit zur durchströmenden Menge,

$$d_B = 0,666 (v \dot{V})^{2/5}$$

woraus f berechnet werden kann zu

$$f = 7,5 \cdot 10^3 [s^{-0,4} m^{-1,8}] (v \dot{V})^{3/5}$$

In Tabelle I sind die Werte zusammengestellt. Obschon die Beziehungen von Hayes und van Krevelen aus Versuchen der Blasenbildung an einer einzelnen Düse gefunden wurden, stimmen die damit berechneten Frequenzen mit den von uns

^{*} Im Gegensatz zu der vollständig von einer beliebig dicken Schicht Flüssigkeit umgebenen Blase, bedeutet Schaumblase, dass das Gasvolumen nur von einer Flüssigkeitsschicht beschränkter Dicke umgeben ist.

gemessenen weitgehend überein. Blasenbildung und Schaumbblasenbildung dürfen daher als analoge Vorgänge betrachtet werden.

Im weiteren findet sich die Aussage von Calderbank ⁹⁾ bestätigt, wonach benachbarte Düsen keinen Einfluss aufeinander ausüben.

Tabelle 1		
Autor	f [Hz]	Ref.
Hayes	18,5	31)
Calderbank	15 ÷ 20	9)
van Krevelen	18,1	38)
eigene Auswertung	17,4 ± 2,6	.

Der Antrieb zum Aufsteigen der Schaumblase ist nicht durch den Auftrieb und den Widerstand bestimmt wie bei der Blase ^{5, 27)}, sondern rührt davon her, dass die fertig gebildete Schaumblase von der nächstfolgenden sich bildenden weggedrängt wird. Die mittlere Aufstiegsgeschwindigkeit einer Schaumblase ist daher, abgesehen vom vernachlässigbaren Einfluss der Kontraktion durch die Flüssigkeitslamellen, gleich der Gasgeschwindigkeit im freien Querschnitt, was durch die Auswertung der Zeitdehnerfilme bestätigt gefunden wurde.

In Figur 6 ist eine Bildfolge aus einem Film wiedergegeben, wobei einerseits die Bildung, andererseits das Aufsteigen der Schaumblase gezeigt werden soll. Es ist auch ersichtlich, dass das mittlere Schaumblasenvolumen mit der Höhe zunimmt, was durch das Entleeren von kleinern Schaumblasen infolge ihres grössern inneren Druckes ²⁾ in benachbarte grössere ^{12, 51)} erklärt werden kann.

In zahlreichen Theorien ³⁾ ist versucht, die Festigkeit der Flüssigkeitslamelle quantitativ zu erfassen, um dadurch die Lebensdauer der Schaumblase angeben zu können. Die Grundvorstellung über die Elastizität ²⁸⁾, als Mass für die Festigkeit der Lamelle, ist, dass diese eine Schicht Flüssigkeit kleiner Oberflächenspannung über der Kernflüssigkeit grösserer Oberflächenspannung hat. Entsteht in der äusseren Schicht eine Leckstelle, so wird die Oberflächenspannung durch die blossgelegte Kernflüssigkeit erhöht. Die Lamelle wird also an Stellen erhöhter Beanspruchung widerstandsfähiger, sie verhält sich elastisch. Nakagaki ⁴⁴⁾ hat die Energie ausgerechnet, die nötig ist, um die Oberflächenschicht zu entfernen. Je grösser diese Energie ist, umso stabiler ist die Lamelle. Experimente haben die Richtigkeit seiner Annahmen qualitativ bestätigt.



t = 0



t = 0,007



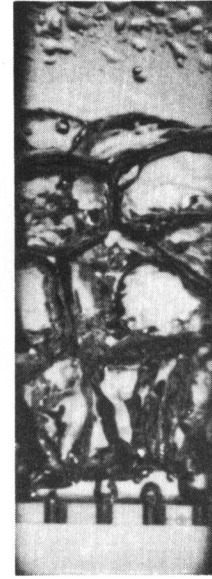
t = 0,014



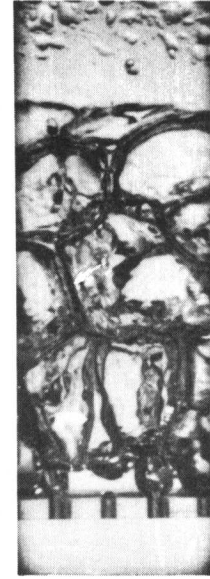
t = 0,021



t = 0,028



t = 0,034



t = 0,042



t = 0,050 s

Schaumbildung auf einem Siebboden

Durch Löcher von 2 mm Durchmesser strömt Luft in Wasser und bringt dieses zum Schäumen. Es sind zwei Lochreihen versetzt im Abstand von 9 mm hintereinander angeordnet, wobei der Lochabstand 14 mm beträgt.

Aus der Bildfolge ist ersichtlich:

- Der Zyklus der Schaumblasenbildung an der zweiten Düse von links. Die Frequenz beträgt 20 Hz.
- Das Aufsteigen einer Schaumblase (Bildmitte), indem diese von der nächstfolgenden weggedrängt wird.
- Die, im vorliegenden Fall nicht sehr ausgeprägte Zunahme des Schaumblasenvolumens gegen oben zu.

Figur 6

Leer - Vide - Empty

Dass die Festigkeit der Lamelle von deren Dicke abhängt, ist bestritten; jedoch gibt de Vries⁵¹⁾ an, dass das Platzen der Schaumblase durch das Auslaufen der interlamellaren Flüssigkeit wahrscheinlicher wird. Inwiefern dabei die Alterung der Oberfläche mitspielt, ist noch unklar.

Die Ursache des Platzens ist nicht bekannt; die Zerstörung durch Spritzer ist keine bindende Erklärung, wurde doch mehrmals³⁾ nachgewiesen, dass Lamellen von durchfliegenden Projektilen nicht zerstört zu werden brauchen.

In Figur 7 ist gezeigt, wie eine Schaumblase platzt. Danach bildet sich in der Kuppel ein Loch, worauf die Lamelle allseitig an den Rand zurückschnellt.

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass die Erfassung der Lebensdauer von Schaumblasen und damit die Möglichkeit^{4, 19, 21)} der Vorausberechnung der Schaumhöhe noch nicht gegeben ist. Eine empirische Beziehung von Eduljee¹⁴⁾ hat sich in unseren Versuchen nicht bestätigt.



$t = 0$

Bild 1



$t = 0,001$

Bild 2



$t = 0,003$ [s]

Bild 3

1 [cm]



Das Platzen von Schaumblasen

Die Bilder sind Ausschnitte aus einem Zeitdehnfilm (Es ist der gleiche Film wie in Figur 6).

Man erkennt eine platzende Schaumblase von der Seite her gesehen.

Figur 7

Zusammenfassend kann der dynamische Schaum wie folgt beschrieben werden: Die Schaumblase wird an der Düse durch Aufblasen einer Flüssigkeitslamelle gebildet. Sie reisst sich von der Düse los, und sie wird zu einem vollständig abgeschlossenen Gasbezirk. Durch die nächstfolgende sich bildende Schaumblase nach oben gedrängt, verliert sie mit zunehmendem Alter an Festigkeit, und platzt schliesslich. Die freiwerdende Flüssigkeit läuft interlamellar nach unten.

3.2. Die Berechnung des Stoffaustausches im dynamischen Schaum

Die gesamte zeitlich übertragene Stoffmenge wird bestimmt durch die Austauschfläche F , die Stoffdurchgangszahl k und das treibende Konzentrationsgefälle.

Die Grösse der Austauschfläche kann, bekannte Schaumhöhe vorausgesetzt, aus der spezifischen Oberfläche O (Oberfläche pro Volumeneinheit Schaum) berechnet werden. Diese hängt von der Form und der Anordnung der Schaumblasen ab, wie Tabelle II zeigt. Das Schaumblasenvolumen wird erhalten aus der gesamten durchtretenden Gasmenge \dot{V} und der nach Abschnitt 3.1. gefundenen Bildungsfrequenz f zu

$$V_B = \frac{\dot{V} \cdot v''}{f \cdot \text{Anzahl Düsen}}$$

Tabelle II			
Form der Schaumblase	Anordnung der Schaumblasen	$O = c \sqrt[3]{1/V_B}$	Ref.
Kugel	Kettenblasen *)	$\pi \sqrt[3]{\frac{\pi}{6 V_B}} = 2,54 \sqrt[3]{1/V_B}$	9)
Kugel	dichteste Kugelpackung	$\frac{4\pi}{6} \sqrt[3]{\frac{\pi}{6 V_B}} = 4,14 \sqrt[3]{1/V_B}$	
Würfel	aneinandergereiht	$= 6,0 \sqrt[3]{1/V_B}$	

*) (Kettenachsen auf Eckpunkte von Quadraten)

Der Proportionalitätsfaktor c kann nach den Messungen von Ju Chin Chu³²⁾ abgeschätzt werden zwischen $c = 2,5 \div 4,5$. Diese Messungen sind allerdings an einer einzelnen Düse gemacht worden; im Schaum wirkt die Vereinigung der Schaumblasen verkleinernd, die grössere Unregelmässigkeit der Form wegen dem Ausnützen der "Ecken" vergrössernd auf c . Für unsere Rechnungen verwendeten wir $c = 4$.

Durch Ueberlagerung²⁴⁾ der Stoffübergangszahlen erhält man die Stoffdurchgangszahl k . Das Bestreben, die Uebergangszahlen in Beziehungen der Form

$$Sh = \text{Funktion}(Re, Sc)$$

zu bringen, war bei der Strömung von zwei fluiden Phasen nur in einigen wenigen Fällen^{10, 27, 41)} erfolgreich. Für Blasen und Schaumblasen ist noch keine befriedigende Beziehung gefunden; zudem wurde gezeigt, dass dort der Stoffübergangswiderstand ebenfalls von der Austauschrichtung abhängt^{16, 25, 52)}. Um dennoch einen Anhaltspunkt zu haben, ist im folgenden Abschnitt der Stoffaustausch im dynamischen Schaum mit demjenigen in ähnlichen Strömungen verglichen.

3.3. Vergleich des Stoffaustausches im dynamischen Schaum mit ähnlichen Strömungen

Da die Stoffübergangszahl wesentlich dadurch bestimmt wird, wie vollkommen die konvektive Strömung oder Mischbewegung⁴⁷⁾ einen Ausgleich zwischen der Grenzfläche und dem Kern zustande bringt, darf man sich in erster Näherung beim gleichen Zweistoffgemisch auf den Vergleich der Strömung beschränken. Da nach Angabe verschiedener Autoren^{25, 29, 41)} der Hauptwiderstand des Stoffdurchgangs beim betrachteten Gemisch, Aethanol-Wasser, auf der Dampfseite liegt, sei in erster Linie die Dampfströmung verglichen. Nimmt man weiter den Druckabfall einer Strömung als Wirkung der Mischbewegung, so ist dadurch eine qualitative Vergleichsmöglichkeit gegeben.

Der Druckabfall eines Siebbodens setzt sich zusammen²⁶⁾ (neuere Arbeiten s. a. ⁴³⁾) aus demjenigen des trockenen Bodens (Berechnungsformel siehe ³⁷⁾) und dem hydraulischen Druckabfall, hervorgerufen durch die Bildung neuer Oberfläche und die Förderung von Flüssigkeit im Schaum. Die Mischbewegung in der Schaumblase rührt von der "Verwirbelung" des durch die Düse tretenden Dampfstrahles her, was durch den Druckabfall des trockenen Bodens angegeben werden kann. Vergleicht man diesen mit dem Druckabfall in einem äquivalenten Rohrstück, für welches der Stoffaustausch mit dem Rieselfilm von Löw⁴¹⁾ untersucht wurde, so ist er zwei bis

drei Zehnerpotenzen grösser. Es ist also zu erwarten, dass in der Schaumblase grössere Stoffdurchgangszahlen (die Stoffübergangswiderstände flüssigkeitsseitig seien vernachlässigt) sind als im Rieselfilm, wie die Werte in Tabelle III bestätigen.

Tabelle III				
Strömung	Austausch- richtung	Stoffdurchgangs- zahl · 10 ⁻⁹ $\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s N/m}^2}$	Re	Ref.
Rieselfilm	Rektifikation	3 + 10	2'000 + 10'000	41)
dynamischer Schaum	Rektifikation	4 + 11	500 + 250*)	**)
Blasen	Aethanoldampf in Wasser	35 + 68		29)
	Rektifikation	130 ***)		25)

*) Die Reynoldszahl ist auf den Schaumblasendurchmesser und die Aufstiegsge-
schwindigkeit bezogen.

***) Die Stoffdurchgangszahl k im dynamischen Schaum wurde abgeschätzt auf
Grund der Messungen in Figur 4.

Als treibendes Konzentrationsgefälle wurde die Partialdruckdifferenz in
 N/m^2 genommen und folgende Annahmen gemacht:

- die Flüssigkeitskonzentration x über der Höhe ist konstant,
- das treibende Konzentrationsgefälle nimmt mit der Höhe exponentiell ab,
- auf gleicher Höhe ist die Dampfkonzentration über dem ganzen Boden gleich
gross: $\bar{y}_\omega = y_\omega$,
- das Raoult'sche Gesetz gilt.

$$k = \frac{\dot{n}}{F \cdot \Delta p} \quad \text{wobei } \dot{n} = \dot{V} \cdot (y_\omega - y_\alpha)$$

$$F = \frac{\pi}{4} D^2 H_{\text{Sch}} \cdot 4 \sqrt[3]{\frac{\text{Lochzahl} \cdot f}{\dot{V} \cdot v''}}$$

$$\Delta p = \frac{\Delta p_\alpha - \Delta p_\omega}{\ln \frac{\Delta p_\alpha}{\Delta p_\omega}} ; \quad \text{setzt man für:}$$

$$\Delta p_\alpha = y^*(x) - y_\alpha$$

$$\Delta p_\omega = y^*(x) - y_\omega$$

$$s_L = \frac{y_\omega - y_\alpha}{y^*(x) - y_\alpha} \quad \text{d.f.} \quad \frac{\Delta p_\alpha}{\Delta p_\omega} = \frac{1}{1 - s_L}$$

so wird

$$\Delta p = \frac{y_\omega - y_\alpha}{\ln \frac{1}{1 - s_L}}$$

***) Die Bedingungen sind dabei dieselben, wie in Figur 4 bei 25) angegeben.

Die Dampfströmung durch Füllkörper ist kontinuierlich und findet feste umlenkende Hindernisse, wogegen der Dampf im dynamischen Schaum in einzelnen abgeschlossenen Bezirken verpackt transportiert wird. Der Vergleich der Druckabfälle ergibt, dass eine Füllkörperschicht von der Höhe der Schaumschicht einen ein- bis fünfmal geringeren Druckabfall aufweist als ein trockener Siebboden³⁶⁾. Der dampfseitige Stoffübergangswiderstand dürfte in beiden Fällen von gleicher Grössenordnung sein. Wesentlich unterscheidet sich aber die Flüssigkeitsströmung: Wie Brauer⁸⁾ festgestellt hat, ballt sich die ablaufende Flüssigkeit zwischen den Füllkörpern zu Bächen zusammen, wodurch der Stoffübergangswiderstand auf der Flüssigkeitsseite erhöht wird, wie Versuche von Klingenspor³³⁾ bestätigen.

Die grösste Aehnlichkeit scheint die in Flüssigkeit aufsteigende Blase mit der Schaumblase zu haben. Der eingehende Vergleich zeigt aber, dass ein wesentlicher Unterschied darin besteht, dass sich die Blase an der sie umgebenden Flüssigkeit abrollt^{23, 27)}, wogegen die Lamelle um die Schaumblase mit dieser mitbeschleunigt wird. Dies wirkt sich dahin aus, dass die interne Dampfströmung in der Blase heftiger und somit die Stoffdurchgangszahl grösser wird als in der Schaumblase.

Zusammenfassend kann anhand der Tabelle III festgestellt werden, dass für das System Aethanol-Wasser die Stoffdurchgangszahl im dynamischen Schaum besser als im Rieselfilm (trotz der dort herrschenden grösseren Re-Zahl, jedoch geringer als bei Blasen ist).

3.4. Die Vorausberechnung des lokalen Verstärkungsverhältnisses

Die Vorausberechnung des Stoffaustausches unter Anwendung von dimensionslosen Gleichungen, in der Art wie es für den Wärmeaustausch selbstverständlich ist, ist noch nicht möglich.

Der in Abschnitt 3.3. eingeschlagene Weg, durch Vergleich mit ähnlichen Strömungsformen die ausgetauschte Stoffmenge zu berechnen, ist als eine Abschätzung zu werten. Man hat dabei aber den Vorteil, keine groben Fehler zu begehen. Halb-empirische Beziehungen zur Berechnung des lokalen Verstärkungsverhältnisses findet man gesichtet in^{16, 18, 46)}. In allen diesen Beziehungen sind jedoch meist unbekannte Werte - zum Beispiel die Schaumhöhe - und nur für bestimmte Gemische und definierte Versuchsbedingungen gültige Zahlenfaktoren enthalten. Ihre Allgemeingültigkeit ist kaum zu erwarten und grosse Abweichungen der berechneten von den effektiven Werten können eintreten.

4. Die Flüssigkeitsdurchmischung auf Siebböden

4.1. Die Darstellung der Durchmischung mittels des Verweilzeitspektrums

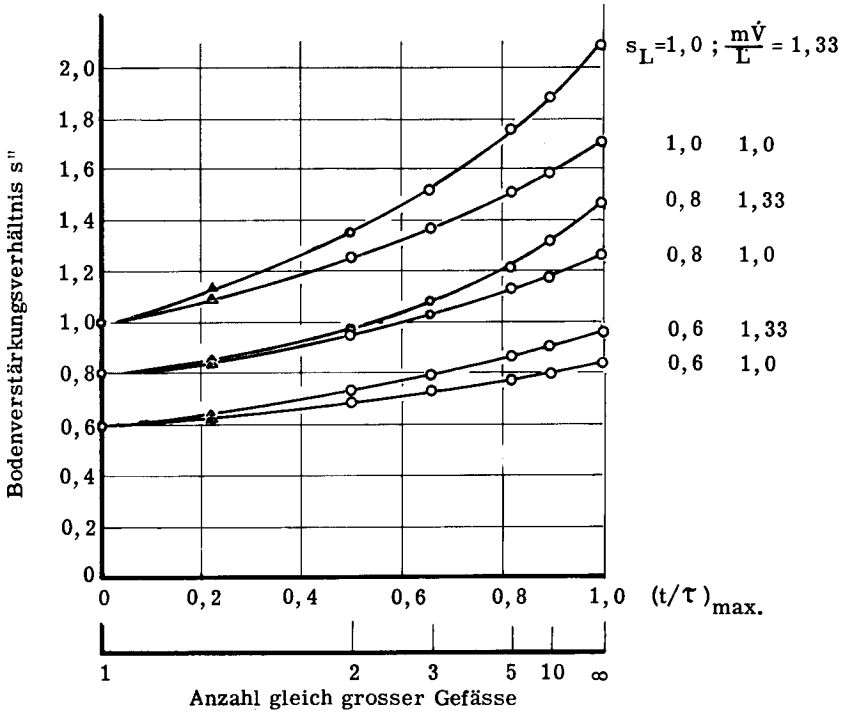
Das Verweilzeitspektrum gibt an, mit welcher jeweiligen Verweilzeit der Anteil einer zur Zeit $t = 0$ gleichzeitig eingegebenen Teilchenzahl ein Gefäß durchläuft. Es charakterisiert die Strömung und kann zur Messung der Durchmischung dienen²²⁾. Zu seiner Interpretierung dienen die nachstehenden zwei Möglichkeiten, deren Anwendung auf die empirisch bestimmten Spektren jeweils diskutiert sei:

1. Die Interpretierung durch ein Modell

Mathematisch einfache Ausdrücke sind für die Spektren von vollkommen und nicht durchmischten Gefäßen bekannt. Ordnet man solche in einem Netz^{*)} an, so ist das resultierende Verweilzeitspektrum berechenbar. Die mathematische Behandlung führt dabei auf den Faltungssatz⁴²⁾ bei der Serieschaltung und auf das additive Superpositionsprinzip^{**)} bei der Parallelschaltung. Das umgekehrte Vorgehen, ein gegebenes Spektrum in ein Netz aufzulösen, ist wegen der Nichteindeutigkeit der Umkehrung des Faltungssatzes sowie des Superpositionsprinzips nicht möglich. Man ist darauf angewiesen, durch Probieren (ein Analogiegerät könnte dazu gebaut werden) ein Netz zu finden, dessen Spektrum dem gegebenen gleicht. Die bei den Versuchen ohne Einbauten aufgenommenen Spektren zeigten, dass die Strömung über einen Siebboden durch ein Modell, bestehend aus zwei in Serie geschalteten vollkommen durchmischten Gefäßen ungleicher Größe, angeglichen werden kann. Das Größenverhältnis braucht dabei nicht ermittelt zu werden; da es die Lage des Maximums des Spektrums bestimmt, genügt es, diese im dimensionslosen Massstab $(t/\tau)_{\max}$ zu kennen. Wie Figur 8 zeigt, lässt sich damit das Verfahren von Gautreaux und O'Connell^{17, 46)} erweitern, indem an Stelle der Anzahl Gefäße n die Lage des Maximums des jeweiligen Spektrums in Abhängigkeit zum Bodenverstärkungsverhältnis s'' gebracht ist, wobei das lokale Verstärkungsverhältnis s_L und der Ausdruck $m\dot{V}/\dot{L}$ Parameter sind. Auf Grund unserer Versuche kann die Lage des Maximums mit der Schaumhöhe und dem Bodendurchmesser in Abhängigkeit gebracht werden (Figur 9). Die dabei überstrichenen Parameter lassen aber noch keine Verallgemeinerung zu.

*) bestehend aus der Parallelschaltung mehrerer Ketten von in Serie geschalteten Gefäßen.

***) Das resultierende Spektrum wird durch Addition der Ordinaten der einzelnen Spektren erhalten, wobei selbstverständlich der Zeitnullpunkt und die Zeitaxe gemeinsam sein müssen.



o nach Gautreaux und O'Connell (Chem. Engng. Progr. 51, 232 1955)

$$s'' = \frac{\dot{L}}{m\dot{V}} \left[\left(1 + \frac{s_L}{n} \cdot \frac{m\dot{V}}{\dot{L}} \right)^n - 1 \right]$$

Δ nach
$$s'' = \frac{s_L}{n_1} + \frac{s_L}{n_2} + \frac{m\dot{V}}{\dot{L}} \cdot \frac{s_L^2}{n_1 n_2} \quad *)$$
, wobei $\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} = 1$

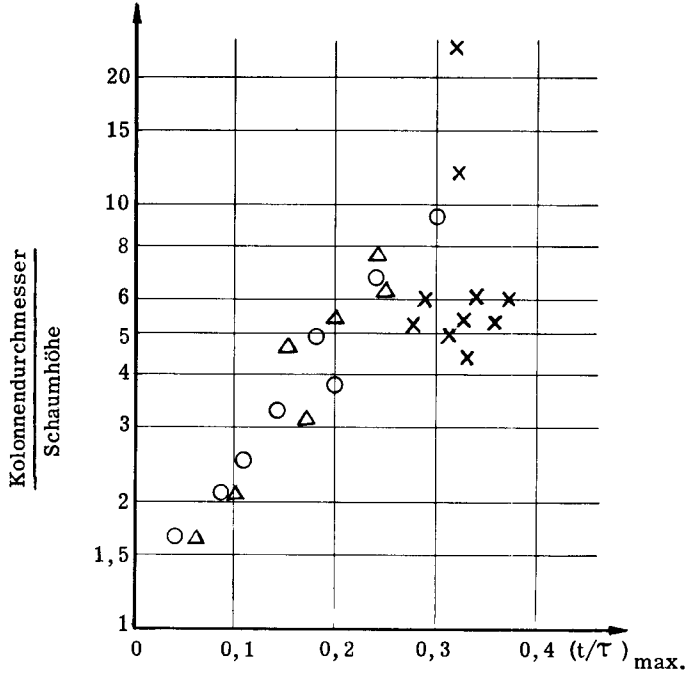
für zwei Gefässe (in Serie) ungleicher Grösse

(eingezeichnetes Beispiel: $1/n_1 = 0,9$; $1/n_2 = 0,1$)

Abhängigkeit des Bodenverstärkungsverhältnisses s'' von der Flüssigkeitsdurchmischung, ausgedrückt durch die Lage des Maximums des Verweilzeitspektrums, mit dem lokalen Verstärkungsverhältnis und $m\dot{V}/\dot{L}$ als Parameter.

Figur 8

*) Herleitung der Formel siehe Anhang, Abschnitt 8.1.



Lage des Maximums des Verweilzeitpektrums

o nach Protokoll Nr. 3

Δ nach Protokoll Nr. 4

x nach Protokoll Nr. 7

Die Lage des Maximums des Verweilzeitpektrums in Abhängigkeit zum Quotienten aus Kolonnendurchmesser D und der Schaumhöhe H_{Sch}

Figur 9

2. Die Interpretierung mit dem scheinbaren Diffusionskoeffizienten

Breiten sich Teilchen während einer Strömung der Gauss'schen Verteilungskurve entsprechend aus, so kann dies durch einen scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_v (eddy diffusion coefficient) dargestellt werden. Er ist der Temperaturleitfähigkeit bei der Wärmeleitung beziehungsweise dem Diffusionskoeffizienten bei der molekularen Diffusion zu vergleichen und ermöglicht so die Anwendung der dort entwickelten Gleichungen¹¹⁾.

Das Verweilzeitspektrum^{*)} einer linearen Strömung in einem beidseitig unbegrenzten Kanal lautet dann:

$$V(t/\tau) = 1/2 \sqrt{\frac{Pe}{\pi \cdot t/\tau}} \exp\left(-Pe \frac{(1 - t/\tau)^2}{4 t/\tau}\right)$$

wobei $Pe = \text{Péclet-Zahl zweiter Art}^{**}) = \frac{l u}{D_v}$

l = Kanalstrecke zwischen Einspritz- und Beobachtungsstelle

u = Strömungsgeschwindigkeit

t/τ = dimensionslose Zeit.

Beim einseitig an der Einspritzstelle begrenzten Kanal lautet das Spektrum^{*)}:

$$V(t/\tau) = 1/2 \sqrt{\frac{Pe}{\pi \cdot t/\tau}} \left\{ \exp\left(-Pe \frac{(1 - t/\tau)^2}{4 t/\tau}\right) + \exp\left(-Pe \frac{(1 + t/\tau)^2}{4 t/\tau}\right) \right\}$$

Kompliziertere Fälle, zum Beispiel der beidseitig begrenzte Kanal, lassen sich aber nicht mehr durch Gleichungen in der Art der obenstehenden angeben⁴⁸⁾.

Die bei unseren Versuchen empirisch bestimmten Verweilzeitspektren waren daher durch Einführung eines scheinbaren Diffusionskoeffizienten nicht befriedigend darzustellen, da sowohl der Zulauf sowie der Ablauf des Bodens einer Grenze gleichkommt.

*) Herleitung der Formeln siehe Anhang, Abschnitt 8.1.

***) auch Bodenstein-Zahl Bo genannt³⁹⁾.

4.2. Die Versuche zur Erklärung der Flüssigkeitsdurchmischung

An einem mit Wasser und Luft betriebenen Modell eines Siebbodens, das vollständig aus Plexiglas gefertigt war, wurden der visuelle Strömungsverlauf sowie der Einfluss von Einbauten untersucht:

Figur 10 zeigt das Vordringen eines eingespritzten Farbstoffes über den Siebboden, von unten her gesehen. Es bildet sich eine "Front", die sich gleichmässig über dem ganzen Querschnitt vorschiebt. Es sind keine bevorzugten Pfade festzustellen (zum Beispiel die Randgängigkeit).

Durch Vergleich der Verweilzeitspektren, aufgenommen mit verschiedenen Einbauten in stets veränderter Lage, konnte deren Wirksamkeit überprüft werden. Bei den Einbauten handelte es sich um Platten, die senkrecht zur Strömungsrichtung zwischen Boden-Zu- und -Abfluss in einem Abstand von 25 mm hintereinander aufgestellt waren. Einbauten, die von oben nur in die Spritzerschicht ragten, hatten keinen Einfluss, ebenso änderten sie, auf dem Boden stehend und 12 mm in die Schaumschicht ragend, das Spektrum nicht. Ihre grösste Wirkung wurde beobachtet, wenn sie von oben bis auf 10 mm über den Boden in der Schaumschicht hingen. In dieser Anordnung wurden dann auch Versuche mit dem Boden gemäss Figur 2 gemacht. Wie Figur 11 zeigt, änderte sich dabei das Verweilzeitspektrum offensichtlich, wobei die gemessene Zunahme des Verstärkungsverhältnisses 20,4 % betrug.

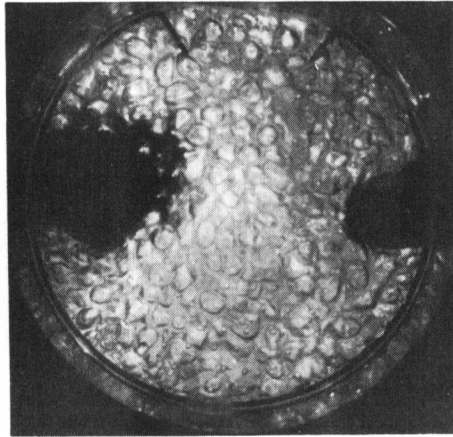
Die Ergebnisse der Versuche lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Spritzerschicht hat keinen Anteil an der Flüssigkeitsdurchmischung.
2. Grosse Schaumhöhe verursacht grosse Durchmischung.
3. Beim Siebboden bilden sich keine vom Dampf unberührt bleibenden Flüssigkeitsströme.

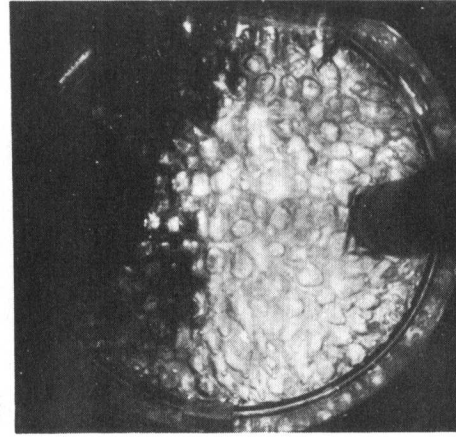
Die Erklärung der Punkte 2 und 3 kann durch die in Abschnitt 3.1. beschriebene Kinematik des dynamischen Schaumes gegeben werden: Die nach oben als Schaumlamelle transportierte Flüssigkeit läuft interlammellar hinunter, wobei die Schaumblasen, wie die Nägel eines Galtonbrettes wirkend, eine Ausbreitung dieser Flüssigkeit verursachen. Je grösser die Schaumhöhe, desto grösser wird die Ausbreitung und damit die Durchmischung. Da diese Ausbreitung allseitig ist, kann jetzt auch erklärt werden, dass sich keine bevorzugte Strömung über den Boden ausbildet.

Das beschriebene Modell der Ausbreitung legt es nahe, diese mit dem in Abschnitt 4.1.2. eingeführten scheinbaren Diffusionskoeffizienten zu messen.

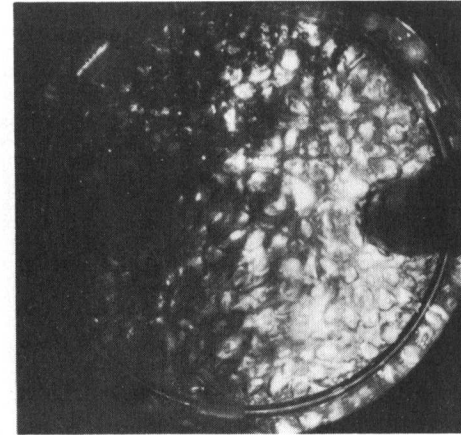
Gerster¹⁹⁾ hat an einem rechteckigen Siebboden Messungen des scheinbaren Diffusionskoeffizienten durchgeführt und gelangt zu dem bestätigenden Ergebnis, dass dieser den Mischungsvorgang beschreibt und dass er nur von der Schaumhöhe abhängig ist.



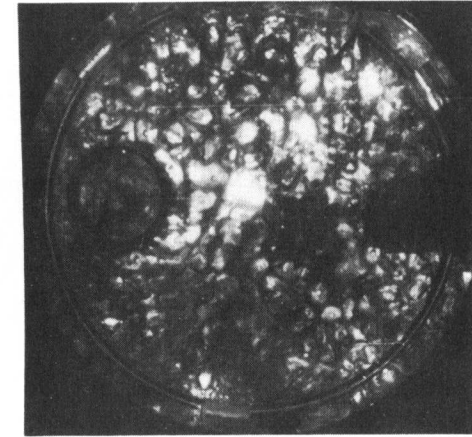
t = 3
Bild 1



t = 5
Bild 2



t = 7
Bild 3



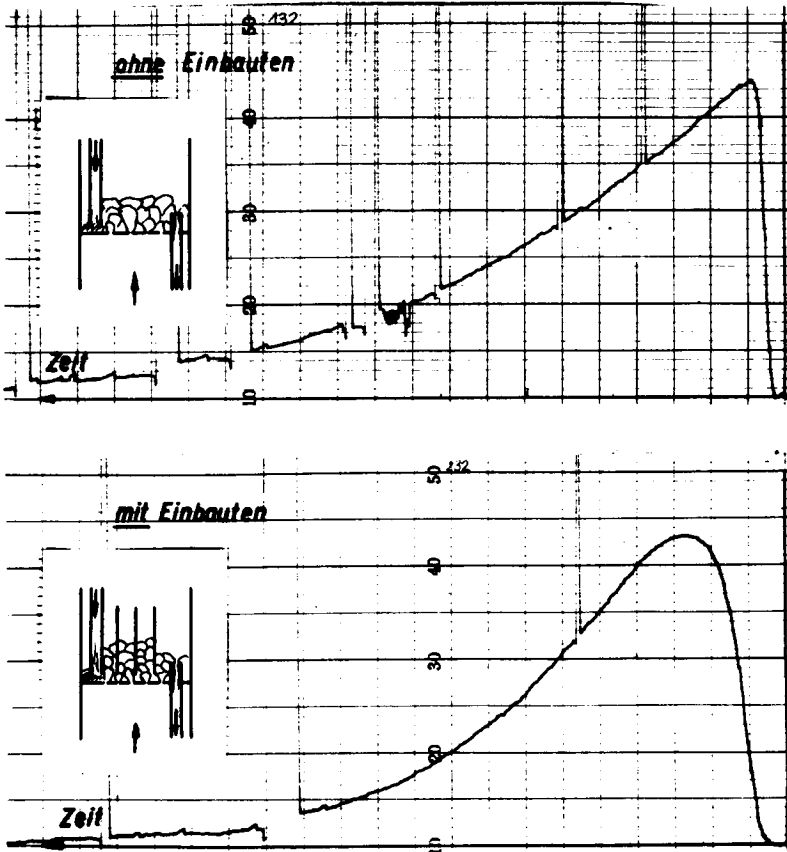
t = 13 s
Bild 4

Das Vordringen eines Farbstoffes über einen Siebboden

Ein Siebboden aus Plexiglas (Durchmesser 14,2 cm), auf welchem Wasser durch Luft aufgeschäumt wird, ist von unten her beobachtet. Der Zulauf zum Boden ist links, der Ablauf rechts sichtbar. In das zufließende Wasser wird zur Zeit $t = 0$ Farbstoff eingespritzt. Dieser füllt den Einlaufbecher (Bild 1), strebt auf der ganzen Breite dem Ablauf zu (Bild 2), wobei die vorderste Kontur immer weniger ausgeprägt wird (Bild 3) und ist schliesslich über den ganzen Boden verteilt (Bild 4). Die Schaumhöhe beträgt 10 cm.

Figur 10

Leer - Vide - Empty



Verweilzeitspektrum der Flüssigkeit auf einem Siebboden

Oberes Beispiel: ohne Einbauten
Messpunkt: Protokoll 4, Schaumhöhe 75 mm

Unteres Beispiel: mit Einbauten
Messpunkt: Protokoll 2, Schaumhöhe 60 mm

Die plötzlichen Ausschläge dienen zur Kontrolle und eventuellen Nacheichung des Instrumentes.

Figur 11

5. Zusammenfassung

Es werden Versuche an Siebböden mit den Gemischen Aethanol-Wasser und Methanol-Aethanol beschrieben, die eine theoretisch abgeleitete Gleichung bestätigen. Diese stellt eine Beziehung zwischen dem Bodenverstärkungsverhältnis (Murphree plate efficiency) und dem lokalen Verstärkungsverhältnis (Murphree local efficiency) her, wobei die Flüssigkeitsdurchmischung auf dem Boden durch das Verweilzeitspektrum charakterisiert ist.

Der Stoffaustausch auf dem Boden geschieht im dynamischen Schaum. Dessen Kinematik ist auf Grund von Filmaufnahmen weitgehend geklärt. Die letzten Ergebnisse zu dem noch nicht gelösten Problem der Berechnung der Schaumhöhe sind zusammengetragen. Vergleiche der Stoffdurchgangszahl zeigen, dass diese im dynamischen Schaum kleiner als bei der einzeln aufsteigenden Dampfblase, jedoch grösser als im Rieselfilm ist.

Die Ursache der Flüssigkeitsdurchmischung ist anhand von Versuchen gefunden, die Vorausberechnung des Verweilzeitspektrums ist aber nicht befriedigend gelöst.

Das Verfahren von Gautreaux und O'Connell zur Vorausberechnung des Verstärkungsverhältnisses ist durch einen für die Praxis leicht ausbaubaren Zusatz erweitert worden.

Es werden Einbauten beschrieben, die eine Zunahme des Verstärkungsverhältnisses von Siebböden bis über 20 % bewirkten.

6. Bezeichnungen

Die Dimensionen der physikalischen Grössen sind an den erforderlichen Stellen im Text angegeben. Es wurde im wesentlichen das Giorgi-System verwendet, wobei aber die Stoffmenge in kmol gemessen ist.

A_{rel}	relative Ausbeute. $A_{rel} = A/A_{max} = \frac{y^*(x_{\alpha}) - y^*(x_{\omega})}{y^*(x_{\alpha}) - y_{\alpha}}$	
c	Proportionalitätsfaktor	-
D_v	scheinbarer Diffusionskoeffizient (eddy diffusivity)	m^2/s
d_B	Schaumblasendurchmesser (kugelförmig)	m
$\exp(a)$	$= e^a$ (e = Basis der natürlichen Logarithmen)	-
F	Fläche	m^2
f	Frequenz	1/s
k	Stoffdurchgangszahl	$kmol/(m^2 N/m^2 s)$
L	Flüssigkeit auf dem Boden	kmol
\dot{L}	pro Zeiteinheit dem Boden zufließende Flüssigkeit	kmol/s
l	Kanalstrecke zwischen Einspritz- und Beobachtungsstelle	m
m	Steigung der Gleichgewichtskurve	-
m_B	Steigung der Bilanzgeraden	-
n	Anzahl in Serie geschalteter Gefässe	-
\dot{n}	zeitliche Stoffmenge	kmol/s
ν	Rücklaufverhältnis	-
O	spezifische Oberfläche = Oberfläche pro Volumeneinheit	m^2/m^3
Pe	Péclet'sche Kennzahl (Definition in 4.1.2.)	-
Re	Reynold'sche Kennzahl	-
Sc	Schmidt'sche Kennzahl	-
Sh	Sherwood'sche Kennzahl ($Sh = \frac{\text{Stoffübergangszahl} \cdot \text{charakteristische Länge}}{\text{Diffusionskonstante}}$)	-

s''	Verstärkungsverhältnis auf Dampfphase bezogen	-
s_L	lokales Verstärkungsverhältnis	-
t	Zeit	s
t/τ	dimensionslose Zeit	-
τ	mittlere Verweilzeit $\tau = L/\dot{L}$	s
τ''	Zeit, die benötigt wird, um eine Menge Flüssigkeit mit der gleichen Menge durchströmenden Dampfes in Berührung zu bringen.	
	$\tau'' = L/\dot{V} = \tau \frac{v}{v+1}$	s
$U(t/\tau)$	Umsatzkurve in dimensionsloser Darstellung; $U(t/\tau) \rightarrow 1$ für $t/\tau \rightarrow \infty$	-
u	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$V(t/\tau)$	Verweilzeitspektrum in dimensionsloser Darstellung; $\int_0^{\infty} V(t/\tau) d(t/\tau) = 1$	-
\dot{V}	zeitliche Dampf- bzw. Gasmenge	kmol/s
V_B	Schaumblasenvolumen	m ³
v	spezifisches Volumen	m ³ /kmol
x	Flüssigkeitskonzentration ($x_0 =$ Anfangskonzentration)	Gew. %
y	Dampfkonzentration	Gew. %
\bar{y}	mittlere Dampfkonzentration	Gew. %
$y^*(x)$	Gleichgewichtskonzentration zu x	Gew. %

Indices

'	flüssig
"	dampfförmig
α	Eintritt
ω	Austritt

7. Literaturverzeichnis

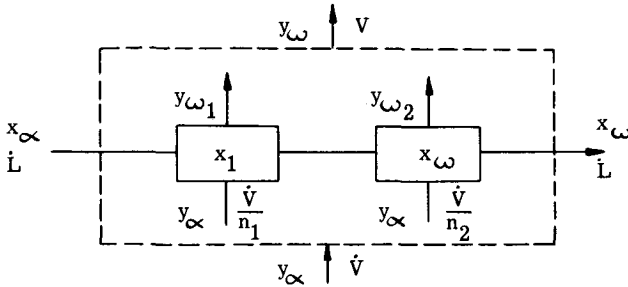
- 1) Amer H. H. et al., Ind. and Eng. Chem. 48 (1956) 142.
- 2) Bikerman J. J., Foams, Reinhold Publishing Corp. New York (1953) 117.
- 3) wie 2) p. 130/132.
- 4) wie 2) p. 27.
- 5) von Bogdandy L. et al., Chem. Ing. Technik 31 (1959) 9, 580/583.
- 6) Brötz W., Grundriss der chemischen Reaktionstechnik, Verlag Chemie GmbH., Weinheim/Bergstr. (1958) 35.
- 7) Carey J. S., Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. 30 (1934) 514.
- 8) Brauer H., Chem. Ing. Technik 29 (1957) 520/530.
- 9) Calderbank P. H., Trans. Inst. Chem. Engrs. 1 (1956) 1, 79/90.
- 10) Calderbank P. H. Brit. Chem. Engng. 1 (1956) 267/274.
- 11) Carslaw H. S. and Jaeger J. C., Conduction of heat in solids, Oxford University Press (1959).
- 12) Clark N. O., Blackman M., Trans. Faraday Soc. 44 (1948) 1, 7.
- 13) Danckwerts P. V., Chem. Engng. Sci. 2 (1953) 1.
- 14) Eduljee H. E., Brit. Chem. Engng. 3 (1958) 14/17.
- 15) Foss A. S. et al., AIChE Journal 4 (1957) 231.
- 16) Frank A., Diss. E.T.H. Nr. 2827 (1958).
- 17) Gautreaux M. F., O'Connell H. E., Chem. Engng. Progr. 51 (1955) 232.
- 18) Gerster J. A. et al., AIChE Research Committee 1958.
- 19) wie 18) S. 34.
- 20) Gilbert T. J., Chem. Engng. Sci., 10 (1959) 243.
- 21) Gleim W. G. et al., J. Angew. Chemie (russ.) 32 (1959) 778/785, s.a. Verfahrenstechnische Berichte 1501 (1959) 1624.
- 22) Grassmann P. Physikalische Grundlagen der Chemie-Ingenieur-Technik, Sauerländer Verlag, Aarau und Frankfurt/Main (1960), Paragraph 7. 23.
- 23) Grassmann P., Chemie-Ing. Technik 29 (1957) 8, 497/504.
- 24) wie 22) Paragraph 9.30.
- 25) Grassmann P., Anderès G., Chem. Ing. Technik 31 (1959) 154/155.
- 26) Grassmann P., Vorlesung über kalorische Apparate und Kältetechnik an der E.T.H.
- 27) Grassmann P., Chem. Ing. Technik 31 (1959) 148/153.
- 28) Grassmann P., Z. VDI, Beiheft Verfahrenstechnik 1 (1942) 28.

- 29) Grossmann U., Diss. E.T.H. Nr. 2396 (1954).
- 30) Hausen H., Forschung Ing.-Wesen 7 (1936) 177.
- 31) Hayes W. B. et al., AIChE Journal 5 (1959) 319/324.
- 32) Ju Chin Chu, AIChE Journal 1 (1957) 16/28.
- 33) Klingenspor H., Chem. Ing. Technik 31 (1959) 598/608.
- 34) Kirschbaum E., Forschung Ing.-Wesen 8 (1957) 63.
- 35) Kirschbaum E., Destillier- und Rektifizierteknik, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg (1950).
- 36) wie 35) Seite 349, verglichen mit Messungen aus Diplomarbeit von A. Mützenber
g.
- 37) Kolodzie jr. P. A. et al., AIChE Journal 3 (1957) 305/312.
- 38) van Krevelen D. W., Hofstijzer P. J., Chem. Engng. Progr. 46 (1950)
29.
- 39) van Krevelen D. W., Dechema Monographien Bd. 32 (1959) 15.
- 40) Lewis W. K., Ind. Engng. Chem. 28 (1936) 399.
- 41) Löw H. P., Diss. E.T.H. Nr. 2801 (1958).
- 42) Mickley H. S. et al., Appl. Math. in Chem. Engng., Chem. Engng. Series,
MacGraw-Hill, New York (1957) 285.
- 43) Muchlenow I. P. et al., J. angew. Chem. (russ.) 32 (1959) 2006/2013, s.
a. Verfahrenstechnische Berichte 1511 (1959) 62.
- 44) Nakagaki M., J. Phys. Chem. 61 (1957) 1266/1270.
- 45) Quigley C. J. et al., Chem. Eng. Progr. Symposium Series 51 (1955) 16.
- 46) Sallaly M., Diss. E.T.H. Nr. 2652.
- 47) Schlichting H., Grenzschichttheorie, G. Braun Verlag (1958) 35.
- 48) Schlup W., dipl. Phys. E.T.H., mündl. Mitteilung, wonach Rücktransfor-
mation Gleichung (9) von O. Lievenspiel (Chem.
Engng. Sci. 10 (1959) 187/191 nicht explizit möglich.
- 49) Schoenemann P., Dechema Monographien Bd. 21 (1952) 203.
- 50) Sherwood T. K., Pigford R. L., Absorption and Extraction, McGraw-
Hill, New York (1952), Fussnote Seite 152.
- 51) de Vries A. J., Kolloid Zeitschrift 159 (1958) 55.
- 52) Zuiderweg I. J., Harmens A., Chem. Ing. Technik 31 (1959) 103.

8. Anhang

8.1. Herleitungen

1. Das Verstärkungsverhältnis s'' für einen Rektifizierboden, der in zwei ungleich grosse, in Serie geschaltete, vollkommen durchmischte Gefässe unterteilt ist:



$$\text{Es sei } \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} = 1 \quad (1)$$

Die Stoffbilanz über das ganze Gebiet ist

$$\dot{L}(x_\alpha - x_\omega) = \dot{V}(y_\omega - y_\alpha) \quad (2)$$

Die Stoffbilanzen der einzelnen Gefässe sind

$$\dot{L}(x_\alpha - x_1) = \frac{\dot{V}}{n_1}(y_{\omega_1} - y_\alpha) \quad (3)$$

$$\dot{L}(x_1 - x_\omega) = \frac{\dot{V}}{n_2}(y_{\omega_2} - y_\alpha) \quad (4)$$

Bei einem Boden mit vollkommener Flüssigkeitsdurchmischung gilt für das Verstärkungsverhältnis⁵⁰⁾:

$$s_L = \frac{y_{\omega_1} - y_\alpha}{y^*(x_1) - \bar{y}_\alpha} \quad (5)$$

$$\text{und } s_L = \frac{y_{\omega_2} - y_\alpha}{y^*(x_\omega) - \bar{y}_\alpha} \quad (6)$$

Die Phasengleichgewichtskurve lasse sich durch eine Gerade darstellen:

$$y^*(x_1) = m x_1 + c \quad (7)$$

$$y^*(x_\omega) = m x_\omega + c \quad (8)$$

Das als Funktion von s_L gesuchte Verstärkungsverhältnis s'' ist definiert als

$$s'' = \frac{y_\omega - y_\alpha}{y^*(x_\omega) - y_\alpha} \quad (9)$$

Die Addition der Gleichungen (3) und (4) gibt

$$L(x_\alpha - x_\omega) = \dot{V} \left[\frac{1}{n_1} (y_{\omega_1} - y_\alpha) + \frac{1}{n_2} (y_{\omega_2} - y_\alpha) \right]$$

und ist gleich der rechten Seite von (2):

$$y_\omega - y_\alpha = \frac{1}{n_1} (y_{\omega_1} - y_\alpha) + \frac{1}{n_2} (y_{\omega_2} - y_\alpha) \quad (10)$$

Aus (5) folgt

$$y_{\omega_1} - y_\alpha = s_L (y^*(x_1) - y_\alpha) \quad (11)$$

Aus (6) folgt

$$y_{\omega_2} - y_\alpha = s_L (y^*(x_\omega) - y_\alpha) \quad (12)$$

Die Subtraktion der Gleichung (8) von (7) gibt

$$y^*(x_1) - y^*(x_\omega) = m(x_1 - x_\omega) \quad (13)$$

$x_1 - x_\omega$ von (4) eingesetzt, gibt für

$$y^*(x_1) = y^*(x_\omega) + m \cdot \frac{\dot{L}}{\dot{V}} \cdot \frac{1}{n_2} (y_{\omega_2} - y_\alpha) \quad (14)$$

(14) in (11) eingesetzt:

$$y_{\omega_1} - y_\alpha = s_L [y^*(x_\omega) - y_\alpha] + m \cdot \frac{\dot{L}}{\dot{V}} \cdot \frac{1}{n_2} (y_{\omega_2} - y_\alpha) \quad (15)$$

Ersetzt man in (10) die beiden Klammern auf der rechten Seite durch die Gleichungen (12) und (15), so folgt:

$$y_\omega - y_\alpha = \frac{s_L}{n_1} \left[(y^*(x_\omega) - y_\alpha) + m \cdot \frac{\dot{L}}{\dot{V}} \cdot \frac{1}{n_2} \cdot s_L (y^*(x_\omega) - y_\alpha) \right] + \frac{1}{n_2} \cdot s_L (y^*(x_\omega) - y_\alpha) \quad (16)$$

Die Division beider Seiten von (16) mit $y^*(x_\omega) - y_\alpha$ liefert die gesuchte Gleichung (9) für das Verstärkungsverhältnis s'' :

$$s'' = \frac{y_\omega - y_\alpha}{y^*(x_\omega) - y_\alpha} = \frac{s_L}{n_1} + \frac{s_L}{n_2} + m \frac{\dot{L}}{\dot{V}} \cdot \frac{s_L^2}{n_1 \cdot n_2} \quad (17)$$

2. Das Verweilzeitenspektrum einer linearen Strömung unter Einführung eines scheinbaren Diffusionskoeffizienten D_V .

- Für den Fall des beidseitig unbegrenzten Kanales geht man aus von Gleichung 2.2. (1) auf Seite 53 des Buches von Carslaw und Jaeger¹¹⁾.

Dabei entspricht:

v Konzentration

x D_V

x $u \cdot \tau$, wobei u = Translationsgeschwindigkeit

τ = mittlere Verweilzeit

Als Initialfunktion ist die Deltafunktion *)

$$f(x') = \delta(x' - u t)$$

einzusetzen.

- Für den Fall des einseitig begrenzten Kanales erfolgt die Herleitung ausgehend von Gleichung 2.4. (1), Seite 59 bei¹¹⁾.

*) Vgl. E. Madelung: Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953 Seite 18.

8.2. Mess- und Auswertprotokolle

Mess- und Auswertprotokoll 1

Bodendurchmesser										190 [mm]
Einbauten										mit
Gemisch										Methanol - Aethanol
Steigung der Gleichgewichtskurve										1,0
Rücklaufverhältnis										∞
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnenquerschnitt										0,192 [m/s]
mittlere kinematische Viskosität der Flüssigkeit										$0,53 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Oberflächenspannung										$19 \cdot 10^{-3}$ [N/m]
Schaumhöhe [mm]	20	25	35	50	62	80	88	105		
Konzentration \bar{y}_ω [Gew. %]	58	59,7	60,6	61,6	62	60,8	60,4	59,8		
Konzentration y_α [Gew. %]	45,3	46,9	46,7	46,6	47	45,8	45,6	45,8		
s" gemessen [%]	92	93	102	110	110	109	108	103		
mittl. Verweilzeit τ [s]	24	26	32	50	74	92	114	149		
s_L (aus Figur 5) [%]	78	81	84	87	91	93	94	95		
Ausbeute A_{rel} *)	,486	,49	,50	,52	,52	,52	,52	,51		
s" berechnet [%]	94,5	97	100	108	108	108	108	104		
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	+2,5	+4	-2	-2	-2	-1	0	+1		
relative Abweichung [%]	+2,7	+4,3	-1,95	-1,82	-1,82	-0,92	0	0,97		

*) Vgl. Definition in Abschnitt 6.

Mess- und Auswertprotokoll 2

Bodendurchmesser	190 [mm]
Einbauten	mit
Gemisch	Methanol - Aethanol
Steigung der Gleichgewichtskurve	1,33
Rücklaufverhältnis	∞
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnen- querschnitt	0,175 [m/s]
mittlere kinematische Viskosität der Flüssigkeit	$0,57 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Oberflächenspannung	$19 \cdot 10^{-3}$ [N/m]

Schaumhöhe [mm]	28	40	50	60	80	90
Konzentration \bar{y}_ω [Gew. %]	31,5	31,6	32,1	31,8	31,5	31,8
Konzentration y_α [Gew. %]	20,9	20,5	20,3	20,0	19,8	20,7
s" gemessen [%]	117	125	135	136	136	126
mittl. Verweilzeit τ [s]	30	40	65	76	96	121
s _L (aus Figur 5) [%]	83	87	91	93	96	97
Ausbeute A _{rel}	,615	,625	,640	,645	,635	,62
s" berechnet [%]	120	125	134	136	132	122
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	+3	0	-1	0	-4	-4
relative Abweichung [%]	+2,56	0	-0,75	0	-2,94	-3,18

Mess- und Auswertprotokoll 3

Bodendurchmesser [mm]	190 [mm]								
Einbauten	ohne								
Gemisch	Methanol - Aethanol								
Steigung der Gleichgewichtskurve	1,0								
Rücklaufverhältnis	∞								
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnenquerschnitt	0,192 [m/s]								
mittlere kinematische Viskosität der Flüssigkeit	$0,53 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]								
Oberflächenspannung	$19 \cdot 10^{-3}$ [N/m]								
Schaumhöhe [mm]	20	25	30	35	40	60	90	115	
Konzentration \bar{y}_{ω} [Gew. %]	59,9	59,1	59,6	61,1	61,0	60,6	59,3	59,3	
Konzentration y_{α} [Gew. %]	48,0	47,0	46,7	47,6	47,7	47,2	45,9	45,9	
s" gemessen [%]	87	88	94	98	97	98	98	98	
mittl. Verweilzeit τ [s]	15	15	19	19	24	64	96	125	
s_L (aus Figur 5) [%]	75	81	84	85	87	93	97	98	
Ausbeute A_{rel}	-	-	-	,487	,487	,49	,49	,50	
s" berechnet [%]	-	-	-	95	95	96,5	96,5	100	
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	-	-	-	-3	-2	-1,5	-1,5	-2	
relative Abweichung [%]	-	-	-	-3,03	-2,06	-1,53	-1,53	-2,04	

Mess- und Auswertprotokoll 4

Bodendurchmesser	190 [mm]
Einbauten	ohne
Gemisch	Methanol - Aethanol
Steigung der Gleichgewichtskurve	1,33
Rücklaufverhältnis	∞
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnenquerschnitt	0,175 [m/s]
mittlere kinematische Viskosität der Flüssigkeit	$0,57 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Oberflächenspannung	$19 \cdot 10^{-3}$ [N/m]

Schaumhöhe [mm]	20	28	38	50	60	75	90	115
Konzentration \bar{y}_ω [Gew. %]	31,9	32,1	32,4	31,6	31,0	30,7	30,7	31,0
Konzentration y_∞ [Gew. %]	22,1	22,0	21,4	21,2	20,9	20,6	20,1	21,0
s" gemessen [%]	103	108	120	114	112	113	122	111
mittl. Verweilzeit τ [s]	20	25	29	47	67	83	112	147
s_L (aus Figur 5) [%]	75	80	86	91	93	95	96	98
Ausbeute A_{rel}	,57	,59	,60	,60	,59	,61	,62	,60
s" berechnet %	100	108	113	113	108	116	123	113
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	-3	0	-7	-1	-4	+3	+1	+2
relative Abweichung [%]	-2,91	0	-5,83	-0,88	-3,56	2,66	0,82	1,80

Mess- und Auswertprotokoll 5

Bodendurchmesser	190 [mm]
Einbauten	mit
Gemisch	Aethanol - Wasser
Steigung der Gleichgewichtskurve	0,2
Rücklaufverhältnis	∞
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnenquerschnitt	0,169 [m/s]
mittlere kinematische Viskosität der Flüssigkeit	$0,72 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Oberflächenspannung	$24 \cdot 10^{-3}$ [N/m]

Schaumhöhe [mm]	50	55	60	80	90	100
Konzentration \bar{y}_ω [Gew. %]	80,0	80,0	79,7	79,6	79,8	78,8
Konzentration y_α [Gew. %]	50,0	51,5	50,0	52,0	52,6	52,9
s" gemessen [%]	109	109	108	107	108	104
mittl. Verweilzeit τ [s]	33	40	50	56	65	72
s _L (aus Figur 4) [%]	95	96	97	99	99	99
Ausbeute A _{rel}	,183	,178	,174	,174	,174	,169
s" berechnet [%]	112	107	105	105	105	102
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	+3	-2	-3	-2	-3	-2
relative Abweichung [%]	+2,75	-1,83	-2,78	-1,87	-2,78	-1,92

Mess- und Auswertprotokoll 6

Bodendurchmesser	190 [mm]
Einbauten	mit
Gemisch	Aethanol - Wasser
Steigung der Gleichgewichtskurve	0,5
Rücklaufverhältnis	∞
mittlere Dampfgeschwindigkeit im freien Kolonnenquerschnitt	0,239 [m/s]
mittlere kinematisch Viskosität der Flüssigkeit	$0,45 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]
Oberflächenspannung	$38 \cdot 10^{-3}$ [N/m]

Schaumhöhe [mm]	20	30	50	75
Konzentration \bar{y}_ω [Gew. %]	62,2	63,5	63,8	63,5
Konzentration y_α [Gew. %]	12	13	11	12
s" gemessen [%]	114	119	122	116
mittl. Verweilzeit τ [s]	43	48	84	150
s _L (aus Figur 4) [%]	83	88	95	98
Ausbeute A _{rel}	,37	,37	,395	,36
s" berechnet [%]	117	117	123	112
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	+3	-2	+1	-4
relative Abweichung [%]	2,64	-1,68	0,82	-3,45

Mess- und Auswertprotokoll 7

Bodendurchmesser		600 [mm]										
Einbauten		ohne										
Gemisch		Aethanol - Wasser										
mittl. kinematische Viskosität der Flüssigkeit		$0,72 \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]										
Oberflächenspannung		$21 \cdot 10^{-3}$ [N/m]										
Rücklaufverhältnis	∞	18,3	9,6	7,7	5,8	5,25	4,5	2,7	2,3	1,0	0,43	
Steigung der Gleichgewichtskurve	0,45	,45	,45	,45	,44	,44	,44	,44	,44	,39	,39	
Schaumhöhe [mm]	110	140	140	120	100	110	110	100	100	50	25	
Dampfgeschwindigkeit im freien Kol. - Querschnitt [m/s]	,193	,211	,195	,206	,158	,186	,180	,154	,151	,117	,096	
Konzentration \bar{y} Gew. [%]	85,0	83,6	83,0	83,0	83,2	82,2	82,5	81,2	81,0	78,5	77,5	
Konzentration y Gew. [%]	75,0	73,0	71,0	70,5	69,0	68,2	67,5	54,2	63,0	55,0	49,0	
s" gemessen [%]	112	105	104	107	110	104	111	103	106	103	110	
mittl. Verweilzeit [s]	48	59	58	48	62,5	63,5	64	66	70	60	86	
s _L (aus Figur 4) [%]	99	99	99	99	99	99	99	99	99	95	85	
Ausbeute A _{rel}	,34	,335	,352	,35	,365	,36	,366	,368	,398	,446	,50	
s" berechnet [%]	114,5	106	102	107	108	109	107	106	104	103	110	
Abweichung des berechneten vom gemessenen Wert für s"	+2,5	+1	-2	0	-2	+5	-4	+3	-2	0	0	
relative Abweichung [%]	2,24	0,95	1,93	0	-1,82	4,8	-3,6	2,91	-1,89	0	0	

Lebenslauf

- 1931 25. Juni in Spiez geboren
- 1938-1947 Besuch der Primar- und Sekundarschule in Spiez
- 1947-1951 Besuch des städtischen Gymnasiums in Bern mit
Maturitätsabschluss Typus C
- 1952-1956 Studium an der Abteilung für Maschineningenieurwesen an der
Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich
mit Diplomabschluss als Maschinen-Ingenieur
- 1957 Assistent am Institut für kalorische Apparate und Kältetechnik
der Eidgenössischen Technischen Hochschule
- seit Januar 1958 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Herrn Prof. Dr. P. Grass-
mann am obgenannten Institut