

## 1. EINLEITUNG

Zum Trennen flüssiger Gemische in deren Komponenten werden die Kondensation und die Verdampfung bzw. die Absorption und Desorption eingesetzt. Hierbei findet ein Phasenwechsel statt, bei dem die größten Konzentrationsdifferenzen für die Gegenstromführung der jeweiligen flüssigen und gasförmigen Phasen vorliegen. Um möglichst große Phasengrenzflächen zu erzielen, werden neben herkömmlichen Bodenkolonnen häufig Schichtungen in Form geordneter Packungen oder ungeordneter Schüttungen eingesetzt [5,49]. Sie befinden sich in zylindrischen Apparaten, in deren Kopfquerschnitt die Flüssigkeit eingespeist wird. Diese bewegt sich gravitationsbedingt in Form von Rieselfilmen, Tropfen oder Rinnsalen durch die Schichtung abwärts. Im Idealfall benetzt sie die gesamte zur Verfügung stehende Oberfläche der Schichtung. Das Gas wird in den Sumpfquerschnitt des Apparates geleitet. Für beide Phasenströme ist auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung über den Querschnitt der Kolonne zu achten.

Wesentliche Konstruktionselemente von Stofftrennkolonnen sind der Tragrost, der Flüssigkeitsverteiler und die Flüssigkeitsrückverteiler. Auf dem flüssigkeits- und gasdurchlässigen Tragrost ruht die Schichtung. Der Flüssigkeitsverteiler dient der gleichmäßigen Aufgabe des Flüssigkeitsstroms im Eintrittsquerschnitt. Durch Flüssigkeitsrückverteiler wird verhindert, dass Ungleichverteilungen, die im Aufgabequerschnitt auftreten, sich über die gesamte Kolonne ausbreiten. Um in Kolonnen geringen Querschnitts Randgängigkeiten zu vermeiden, kommen Randabweiser zwischen der Apparatewand und der Schichtung zum Einsatz. Das Gas wird im Sumpfquerschnitt zugeführt und strömt im Gegenstrom zur Flüssigkeit. Für Schichtungen mit geringen Druckverlusten sind im Sumpfquerschnitt gesonderte Verteiler für die gleichmäßige Aufgabe des Gasstroms über den Querschnitt notwendig.

Als Schichtungen kommen ungeordnete Füllkörperschüttungen oder geordnete Packungen zum Einsatz. Ungeordnete Schichtungen können aus einer Vielzahl

unterschiedlicher Füllkörper bestehen. Neben einfachen Körpern aus Vollmaterial (z.B. Kugeln, Zylinder) werden heute meist Füllkörper mit großem Lückenvolumen verwendet. Dazu gehören zylinderförmige Füllkörper (z.B. PALL-Ringe, RASCHIG-Ringe), kugelförmige Füllkörper (z.B. HACKETTEN, ENVIPAC) und Sättel (z.B. BERL-Sattel, INTALOX-Sattel). Sie werden aus unterschiedlichen Materialien wie z.B. Keramik, Metall oder Kunststoff hergestellt. Entscheidend für die Wahl des Materials sind dessen korrosive Eigenschaften, die Benetzbarkeit für ein Stoffsystem sowie die Betriebstemperatur. Geordnete Schichtungen bestehen aus regelmäßig angeordneten Füllkörpern oder strukturierten Packungen (engl. structured packings). Letztere werden aus gewelltem Blech, Gewebelagen, Waben-, Grid- oder Skelettstrukturen meist aus Metall oder Kunststoff hergestellt. Strukturierte Packungen zeichnen sich durch einen hohen Lückengrad, hohe Trennleistungen, hohe Kapazität und geringe Druckverluste aus. Sie werden deshalb häufig für die Vakuumrektifikation und für die Kapazitätserweiterung bestehender Anlagen eingesetzt [86]. Blechpackungen bestehen aus gelochten, schräg gewellten Blechen, welche mit alternierender Richtung der Wellen hintereinander angeordnet werden. Durch die Kanalstruktur weisen sie ausgeprägte Vorzugsrichtungen für die Strömung auf. Diese anisotropen Eigenschaften führen im Vergleich zu ungeordneten Schichtungen zu einer höheren Empfindlichkeit für eine Ungleichverteilung der Phasen und für Instabilitäten im Strömungsfeld. Die numerischen Berechnungen und Messungen der zweiphasigen Strömung werden in dieser Arbeit beispielhaft am Packungstyp MELLAPAK 250.Y (PP) der Firma Sulzer durchgeführt.

## 2. ZIELE DER ARBEIT

Das Dimensionieren von Schichtungen erfolgt bislang mit Hilfe empirischer und halb-empirischer Gleichungen, die stationäre und über den Kolonnenquerschnitt konstante Parameter voraussetzen [5,56]. Ungleichverteilung der Phasen und Instabilitäten im Strömungsfeld beeinflussen das Trennergebnis jedoch erheblich und treten vor allem unter technisch relevanten Betriebsbedingungen nahe der Staugrenze auf [13,90,91].

Ziel der Arbeit ist es, das zweiphasige, räumliche und zeitveränderliche Strömungsfeld in mit geordneten Schichtungen ausgerüsteten Apparaten numerisch zu berechnen. Dazu wird ein physikalisch begründetes Modell hergeleitet. Schichtungsspezifische Parameter werden für die strukturierte Packung MELLAPAK 250.Y (PP) gemessen oder der Literatur entnommen. Zum Überprüfen der numerischen Ergebnisse werden die Röntgenprojektion und die Röntgentomographie eingesetzt.

Für die Modellbildung wird die Schichtung in Elementarzellen unterteilt. Eine Elementarzelle stellt die kleinste, sich in allen drei Raumrichtungen periodisch wiederholende Einheit dar. Die Massen- und Impulsbilanzgleichungen werden zunächst für den Maßstab der Elementarzelle mit lokalen Größen formuliert. Die daraus abgeleiteten Beziehungen beschreiben den Zusammenhang zwischen den über eine Elementarzelle gemittelten Größen: Der Druckgradient und die auf die flüssige Phase wirkenden Impulskräfte werden als Funktionen der Strömungsgeschwindigkeiten und der Phasenanteile formuliert. Aufgrund der anisotropen Schichtungsstruktur ergibt sich zusätzlich eine Abhängigkeit von der Strömungsrichtung. Der Impulsaustausch zwischen Schichtung und fluiden Phasen kann so berücksichtigt werden, ohne die Schichtungsstruktur geometrisch exakt abzubilden.

Mit Hilfe der in der Elementarzelle gemittelten Größen werden die Massen- und Impulsbilanzgleichungen für den Maßstab der gesamten Schichtung formuliert.

Die Gleichungen werden mit dem kommerziell erhältlichen Strömungssimulationsprogramm ANSYS CFX 10 gelöst.

Als Ergebnis wird das makroskopische Strömungsfeld in Apparaten im technischen Maßstab erhalten. Es werden stationäre und zeitveränderliche Strömungsfelder unterhalb und oberhalb der Staugrenze berechnet.

### 3. STAND DES WISSENS

Ungeordnete Schichtungen werden bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts zur Trennung mehrphasiger Gemische eingesetzt [56]. Die Untersuchung und Beschreibung der Fluidodynamik in Schichtungen ist seitdem Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. Ein Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen für ihre Anwendung in der industriellen Praxis werden in Fachbüchern von Billet [5], Kister [47,49,49], Mackowiak [56] und Stanek [88] gegeben.

Die Fluidodynamik in Schichtungen wird üblicherweise durch den längenbezogenen Druckverlust und den gesamten relativen Flüssigkeitsinhalt charakterisiert. In Bild 3.1 ist die Abhängigkeit dieser Parameter für unterschiedliche Volumenstromdichten der Flüssigkeit schematisch dargestellt. Für die berieselte Schichtung sind insbesondere zwei Betriebspunkte kennzeichnend: Bis zur Staugrenze A-A ist der Impulstransport zwischen der gasförmigen und der

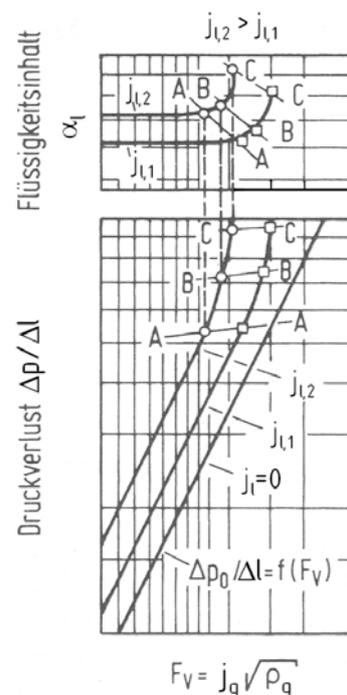


Bild 3.1 Schematische Darstellung des spezifischen Druckverlusts  $\Delta p / \Delta l$  und des relativen Flüssigkeitsinhalts  $\alpha_l$  der Schichtung in Abhängigkeit von der Volumenstromdichte der Gasphase  $j_g$ . Quelle: [56]

flüssigen Phase vernachlässigbar, so dass der Flüssigkeitsinhalt der Schichtung für eine gleich bleibende Berieselungsdichte konstant ist. Im Staubereich nimmt der Impulstransport zwischen den Phasenströmen für steigende Gasvolumenströme zu, bis an den Flutpunkten C-C eine Phaseninversion auftritt, d.h. das Gas strömt in Form von Blasen oder Pfropfen durch die flüssige Phase. Der Betriebsbereich einer Schichtung bestimmt deren Trennleistung und den erreichbaren Produktdurchsatz.

Für die Vorhersage der Fluidodynamik in Schichtungen wird meist von idealen Bedingungen ausgegangen, d.h. es wird eine gleichmäßige Verteilung der flüssigen und der gasförmigen Phase über die einzelnen Querschnitte des Schichtungsvolumens vorausgesetzt. Daraus resultiert eine eindimensionale Beschreibung mit jeweils einheitlichen Größen entlang der Schichtungshöhe. Für einen Überblick über die zahlreichen vorgeschlagenen Korrelationen sowie Messwerte für unterschiedlichste Typen von Füllkörpern und Packungen wird auf die oben genannten Fachbücher verwiesen.

In Schichtungen des technischen Maßstabs treten vermeidbare sowie unvermeidbare Ungleichverteilungen der Phasen auf, die die Trennleistung beeinflussen [90]. Daher wird eine Beschreibung der Fluidodynamik angestrebt, in der die lokalen Variationen der Parameter des Strömungsfelds entlang des Schichtungsvolumens berücksichtigt sind. Als Voraussetzung für die Entwicklung von detaillierten Modellen wird nicht-invasiven, insbesondere tomographischen, Messtechniken eine besondere Bedeutung beigemessen [18,86]. In den folgenden Abschnitten wird ein Überblick über Arbeiten gegeben, die die ein-, zwei- oder dreidimensionale Beschreibung des Strömungsfelds in Schichtungen in Form von Messungen oder Modellen zum Ziel haben.

Modelle zur Vorhersage des Flüssigkeitsinhalts in Schichtungen basieren meist auf Betrachtungen am Flüssigkeitsfilm auf der geneigten Ebene oder in Rohren [5]. Brauer [9] leitet ein analytisches Modell für die Gas-Filmströmung im senkrechten Rohr her. Unter der Voraussetzung laminar strömender Flüssigkeitsfilme berechnet er die Vergrößerung der Filmdicke in Abhängigkeit der Schubspannung an der Phasengrenzfläche zwischen Gas- und Flüssigkeitsstrom. Das Modell enthält keine empirischen Korrelationen und ermöglicht so eine

---

einfache, physikalisch begründete Modellbildung des Flüssigkeitsinhalts in Schichtungen.

### 3.1 Messung der Phasenverteilung in Schichtungen

Die Verteilung der Flüssigkeit in mehrphasig durchströmten Schüttungen ist bereits um 1900 Gegenstand von Forschungsarbeiten [37,46]. Um die Verteilung des Flüssigkeitsstroms über den Schichtungsquerschnitt zu messen, wird der Querschnitt unterhalb der Schichtung in Sektionen eingeteilt. Für jede Sektion wird der Flüssigkeitsstrom separat gemessen [4,8,28-30,50,51,57,58,90-92]. Hoek, Wesselingh und Zuiderweg [30] beobachten für jeweils 30-40 Füllkörper ein Rinnsal. Sie deuten dies als Schichtungseigenschaft, die nicht ausgeglichen werden kann (*small scale maldistribution*). Großräumige Ungleichverteilungen, die auf Randgängigkeit oder mangelhafte Flüssigkeitsverteiler zurückzuführen sind, bezeichnen sie dagegen als *large scale maldistribution*. Untersuchungen von Stikkelman [90,91] an strukturierten Packungen aus gewellten Schichten ergeben, dass sich nach etwa drei Lagen von Packungselementen ebenfalls eine charakteristische Ungleichverteilung der Volumenstromdichte der Flüssigkeit einstellt, die in den darauf folgenden Lagen konstant bleibt. Er bezeichnet sie als *natürliche* Ungleichverteilung. Jede Eingangsverteilung geht sowohl für geordnete als auch für ungeordnete Schichtungen für eine ausreichende Schichtungshöhe in diese natürliche Ungleichverteilung über.

Für Schichtungen, die im Gegenstrom betrieben werden, wird die Verteilung des Volumenstroms der Gasphase analog in Sektionen oberhalb der Schichtung gemessen [50,51,90-93]. Die Ungleichverteilung der Volumenstromdichte des Gases wird im Vergleich zu der der flüssigen Phase übereinstimmend als unwesentlich bezeichnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Ungleichverteilung der Gasphase aufgrund horizontaler Druckgradienten sehr rasch ausgleichen kann.

Die Messungen am Ein- und Austrittsquerschnitt der Schichtung lassen nur eingeschränkt Aussagen über die Verteilung der Phasen innerhalb der Schichtung zu. Daher wurden Messverfahren entwickelt, die die Messung auch im Volumen der Schichtung ermöglichen.

Stichlmair und Stemmer [89], Potthoff [71], Schneider und Stichlmair [83] und Schneider [82] führen Untersuchungen mit einem Stoffsystem durch, bei dem infolge des Stoffübergangs zwischen den Phasen eine messbare Temperaturänderung auftritt. Anhand der im Schichtungsvolumen gemessenen Temperaturverteilung treffen sie Aussagen über den Grad der Ungleichverteilung.

Um die Strömung nicht zu stören, eignen sich zum Messen der Phasenverteilung in Schichtungen insbesondere nicht-invasive Verfahren. Mit Hilfe der  $\gamma$ -Strahldensitometrie messen Süess und Spiegel [94] das Profil des Flüssigkeitsinhalts entlang der Höhe einer geordneten Schichtung. Oberhalb der Staugrenze stellen sie im Bereich des Stoßes von zwei übereinander angeordneter Packungselementen einen erhöhten Flüssigkeitsinhalt fest.

Als nicht-invasives, örtlich auflösendes Messverfahren ermöglicht die Tomographie, Schnittbilder der Phasenverteilung in Schichtungen ohne Rückwirkung auf das Strömungsfeld zu erhalten. Aufgrund der hohen örtlichen Auflösung wird hierfür insbesondere die Röntgentomographie eingesetzt [45,55,61,62,80,81,97-99]. Andere tomographische Messtechniken, die für die Untersuchung der Phasenverteilung in Schichtungen Anwendung finden, beruhen auf der Absorption von  $\gamma$ -Strahlung [7,8,78], der Änderung der elektrischen Kapazität [73-75] oder der Magnetresonanz [21,22,84]. Für die Auswahl eines geeigneten Messverfahrens sind die physikalische Eignung des Messprinzips, das örtliche und zeitliche Auflösungsvermögen, die Kosten und der apparative Aufwand gegeneinander abzuwägen.

Eine Zusammenstellung bekannter experimenteller Arbeiten zur Untersuchung des Strömungsfelds in Schichtungen ist in Tabelle 3.1 gegeben.