



Martin Behling (Autor)

Messen der lokalen Phasenanteile in dreiphasig betriebenen Blasensäulen mit Hilfe der Dual-Energie Röntgentomographie

Messen der lokalen Phasenanteile
in dreiphasig betriebenen Blasensäulen
mit Hilfe der Dual-Energie Röntgentomographie

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Martin Behling
geboren am 20. Juli 1974 in Greifburgwedel

2008

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/1441>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. EINLEITUNG

Blasensäulen sind senkrecht stehende zylindrische Apparate, in denen als kontinuierliche Phase eine Flüssigkeit vorliegt. Eine gasförmige Phase wird im Sumpf der Blasensäule in der Flüssigkeit dispergiert. Infolge von Auftriebskräften steigen die Gasblasen in der Flüssigkeit auf, das Gas entweicht am Kopf der Blasensäule. Durch die große Oberfläche zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase werden Gas und Flüssigkeit während der Verweilzeit der Blasen in der Flüssigkeit intensiv in Kontakt gebracht. Blasensäulen werden daher in der chemischen Industrie in großer Anzahl als Apparate für den Stoffaustausch und als Reaktoren für eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse eingesetzt.

Durch die aufsteigenden Blasen wird für höhere Volumenstromdichten des Gases eine stark turbulente Strömung der Flüssigkeit in der Blasensäule hervorgerufen. Dadurch ist die Durchmischung in der Blasensäule sehr gut, was hohe Wärme- und Stoffaustauschraten zur Folge hat. Ein weiterer Vorteil von Blasensäulen ist der einfache und damit kostengünstige konstruktive Aufbau. Durch das vollständige Fehlen beweglicher Bauteile sind Blasensäulen kaum störungsanfällig und sehr wartungsarm.

Eine Sonderform stellen die dreiphasig betriebenen Blasensäulen dar, in denen als dritte Phase partikelförmiger Feststoff in der Flüssigkeit suspendiert ist und durch die Gas- und Flüssigkeitsströmung herumgewirbelt wird. Zum besseren Fluidisieren der Feststoffpartikeln wird der durch die Gasblasen hervorgerufenen Strömung häufig eine aufwärtsgerichtete Strömung der Flüssigphase überlagert. Die häufigsten Varianten dreiphasig betriebener Blasensäulen sind chemische Reaktoren mit partikelförmigem Katalysator und Bioreaktoren, in denen die Biomasse auf der Oberfläche von Immobilisationspartikeln siedelt.

2. ZIELE DER ARBEIT

Der in Blasensäulen erzielbare Stoffaustausch und Reaktionsumsatz hängt wesentlich von der für den Stoffübergang zur Verfügung stehenden Phasengrenzfläche, der Durchmischung und der Verweilzeit der Gasblasen während des Aufstiegs durch die Flüssigkeit ab. Trotz der einfachen Konstruktion der Blasensäule bilden sich durch die aufsteigenden Gasblasen sehr komplexe Strömungsformen aus, die auf analytischem Weg nicht vorhersagbar sind. Für niedrige Volumenstromdichten stellt sich in der Blasensäule die homogene Strömungsform mit vergleichsweise enger Verweilzeitverteilung der Blasen in der Flüssigkeit ein. Über den ganzen Querschnitt der Blasensäule wird gleichmäßiger Aufstieg der Gasblasen beobachtet. Für industriell relevante hohe Volumenstromdichten des Gases stellt sich allerdings die turbulente heterogene Strömungsform ein, für die Blasenkoaleszenz und -zerfall die Strömung in der Blasensäule dominieren. Es bildet sich ein zentraler Blasenschwarm aus Großblasen, die in der Mitte der Blasensäule spiralförmig sehr schnell aufsteigen. In Wandnähe bilden sich aus Kontinuitätsgründen abwärts gerichtete Strömungsbereiche, in denen Gasblasen mit der abwärts strömenden Flüssigkeit nach unten gerissen werden. Die Verweilzeitverteilung ist wesentlich breiter als für die homogene Strömungsform.

In der Vergangenheit erfolgte die Dimensionierung von Blasensäulen in der Regel mit Hilfe von empirischen Gleichungen, die auf Messergebnissen an Modellblasensäulen im Labormaßstab beruhen. Probleme ergeben sich z.B. beim Scale-Up vom Labormaßstab in industrielle Größenordnungen, da sich in unterschiedlich großen Blasensäulen prinzipiell andere Strömungsformen ausbilden können. Ziel der aktuellen Entwicklung ist daher die Formulierung physikalisch begründeter Gleichungssysteme zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge in Blasensäulen. Mit Hilfe dieser Gleichungssysteme und der Betriebsparameter projektierter Blasensäulen soll eine genauere Vorhersage der

sich einstellenden Strömungsformen und des erzielbaren Stoffumsatzes möglich werden. Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der aufgestellten Gleichungssysteme werden die numerisch berechneten Vorhersagen mit an Modellblasensäulen gemessenen experimentellen Ergebnissen verglichen. Vor allem für dreiphasig betriebene Blasensäulen sind die hierfür in der Literatur verfügbaren experimentellen Daten nicht ausreichend.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher das Messen von Phasenverteilungen in einer dreiphasig betriebenen Blasensäule im Technikumsmaßstab. Die lokalen Phasenanteile aller drei Phasen sollen berührungslos ohne Beeinflussung der Strömung in der Blasensäule gemessen werden. Eine hierfür geeignete Messtechnik ist kommerziell nicht verfügbar. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Dual-Energie-Röntgentomograph entwickelt und erstellt. Mit Hilfe dieser Messtechnik können berührungslos Schnittbilder durch die Blasensäule gemessen werden. Für jeden Punkt der Messebene können daraus die lokalen Phasenanteile aller drei Phasen unabhängig voneinander berechnet werden.

3. STAND DER FORSCHUNG

Blasensäulen-Reaktoren werden in der chemischen Industrie für zahlreiche Anwendungen eingesetzt [30,40,45]. Deckwer [27] gibt eine Übersicht zu den unterschiedlichen Bauformen und deren Verwendung. Die physikalischen Grundlagen der auftretenden Transportprozesse für Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch werden von Brauer [12] dargestellt. Die Mehrzahl der industriell eingesetzten Blasensäulen wird mit einer kontinuierlichen flüssigen und einer darin dispergierten gasförmigen Phase betrieben. Eine Sonderform stellen die dreiphasig betriebenen Blasensäulen dar, in denen ein partikelförmiger Feststoff als zusätzliche Phase in der flüssigen suspendiert ist [41,51,82,117]. Der partikelförmige Feststoff ist dabei je nach Anwendung Reaktand [2,107] oder dient als Katalysator [28]. Dreiphasig betriebene Blasensäulen werden auch als Bioreaktoren verwendet [98]. Die Biomasse liegt dann als Feststoff vor. Häufig werden zur Immobilisierung der Zellkulturen Feststoffpartikeln in der Blasensäule suspendiert, deren Oberfläche von den Zellkulturen besiedelt ist [73,87,95].

3.1 Mehrphasige Strömungsfelder in Blasensäulen

Einen kurzen Überblick über die Vielzahl an existierenden experimentellen und theoretischen Forschungsarbeiten geben Lehr [66] für zweiphasig betriebene Blasensäulen und Wiemann [128] für zwei- und dreiphasig betriebene Blasensäulen. Die Strömungsformen in Blasensäulen werden auch von Chen et al. [23], Warsito und Fan [125,126] und Warsito et al. [123,124] dargestellt.

Es wird zwischen der homogenen und der heterogenen Blasenströmung in der Blasensäule unterschieden. Diese Strömungsformen sind in Bild 3.1 schematisch dargestellt.

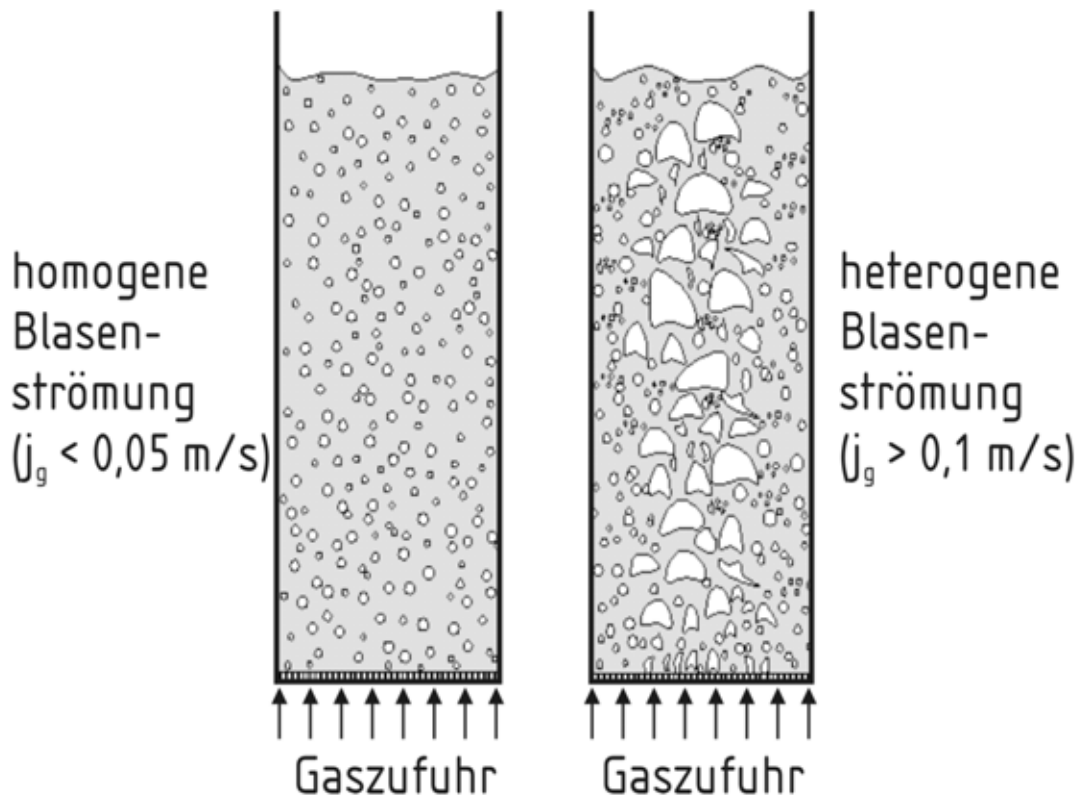


Bild 3.1 Homogene und heterogene Blasenströmung in der Blasen Säule

Für kleine Volumenstromdichten des Gases bildet sich die homogene Strömungsform aus. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass Blasenzerfall und Blasenkoaleszenz nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Blasen weisen über den gesamten Querschnitt der Blasen Säule eine aufwärts gerichtete Bewegung auf. Die Blasengrößenverteilungen sind über den Querschnitt der Blasen Säule gleichmäßig. Eine Veränderung der Blasengröße während des Aufstiegs findet infolge des abnehmenden hydrostatischen Drucks statt.

Für höhere Gasvolumenströme bildet sich der heterogene Strömungszustand aus. Die Strömung ist in der Blasen Säule durch Blasenzerfalls- und Koaleszenzvorgänge geprägt. Dadurch entstehen Großblasen. Diese bilden einen Großblasenschwarm, der in der Mitte der Blasen Säule spiralförmig aufsteigt und dabei um die vertikale Achse der Blasen Säule rotiert, wie in Bild 3.2 nach Chen, Reese und Fan [23] schematisch dargestellt ist.

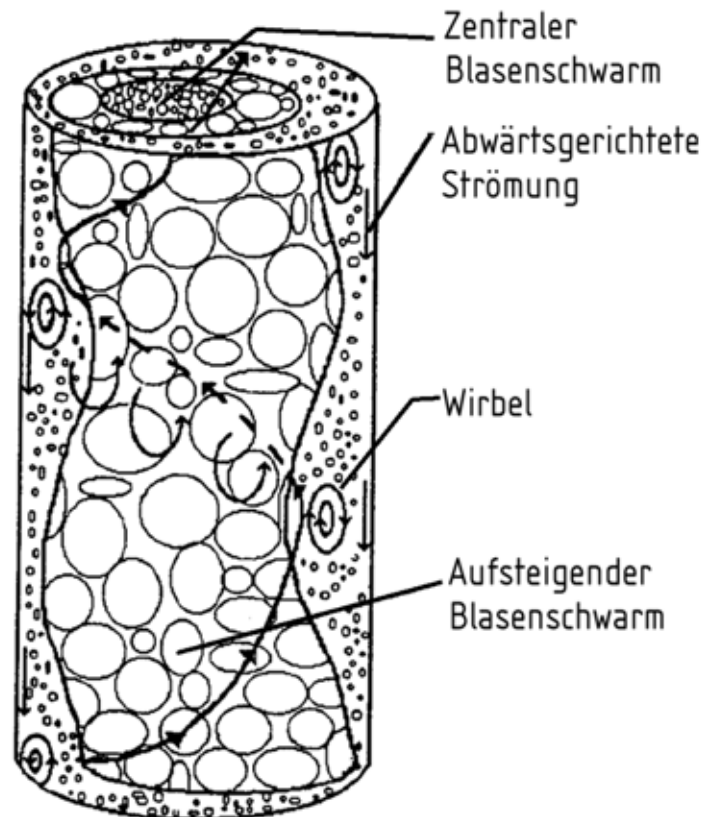


Bild 3.2 Heterogene Blasenströmung in zwei- und dreiphasig betriebenen Blasen Säulen nach Chen, Reese und Fan [23]

An der Wand der Blasen Säule bilden sich abwärts gerichtete Strömungsbereiche aus, in denen kleine Blasen mit der Strömung der Flüssigkeit nach unten gerissen werden. Zwischen auf- und abwärts gerichteter Strömung bilden sich Wirbel.

Die Existenz homogener und heterogener Strömungsformen wird sowohl in zwei- als auch in dreiphasig betriebenen Blasen Säulen beobachtet [72,93]. Dem durch den Aufstieg der Gasblasen beeinflussten turbulenten Strömungsfeld kann zum besseren Fluidisieren der festen Partikeln in dreiphasig betriebenen Blasen Säulen eine aufwärts gerichtete Strömung der Flüssigkeit überlagert sein [8].